

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra aplikované mechaniky

Návrh uchycení termokamery pro termoelastická měření

Design of Thermocamera Gripping for Thermoelastic  
Measurements

Student

Tomáš Vlček

Osobní číslo

VLC0083

Vedoucí práce

Ing. Michal Kořínek

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra aplikované mechaniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Vlček**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika  
Téma: **Návrh uchycení termokamery pro termoelastická měření**  
**Design of Thermocamera Gripping for Thermoelastic Measurements**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis principu termovize
2. Návrh konstrukce uchycení termokamery na sloup trhačského stroje
3. Simulace MKP
4. Příprava CAD modelu pro 3D tisk
5. Verifikace prototypu
6. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

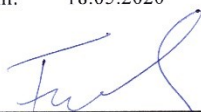
- [1] KOLÁŘ, Vladimír, Viktor KANICKÝ a Ivan NĚMEC. *FEM Principy a praxe metody konečných prvků*. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 1997, 401 s. ISBN 80-722-6021-9
- [2] HOSCHL, Cyril. *Pružnost a pevnost ve strojírenství*. SNTL Praha 1971
- [3] LENERT, Jiří. *Pružnost a pevnost II*. Ostrava 1988. ISBN 80-7078-572-2
- [4] MACURA, Pavel. *Experimentální metody v pružnosti a plasticitě*. VŠB – TU Ostrava 2001, ISBN 80-7078-934-4
- [5] ČSN ISO 12111 *Kovové materiály – Zkoušení únavy – Metoda zkoušení termomechanické únavy řízenou deformací*
- [6] DEJL, Zdeněk. *Konstrukce strojů a zařízení I: Spojovací části strojů. Návrh, výpočet, konstrukce*. Vyd. 1. Ostrava: Montanex a.s., 2000. 225 s. ISBN 800-7225-018-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Kořínek**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 18.5.2020



.....  
podpis

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.5.2020



.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Tomáš Vlček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Ratibořská 139a, Opava, 747 05

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VLČEK, Tomáš. *Návrh uchycení termokamery pro termoelastická měření: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2020, 75 s. Vedoucí práce: Michal Kořínek.

Bakalářská práce se zabývá návrhem a pevnostním výpočtem konstrukce uchycení termokamery zhotovené metodou 3D tisku na sloup biaxiálního pulsátoru. V teoretické části jsou popsány některé elektromagnetické zákony, které souvisí s principem termálního snímání, a popis funkce nejpoužívanějších senzorů infračerveného záření. V praktické části je popsána navržená konstrukce uchycení, která je v další části podrobena výpočtu pomocí metody konečných prvků. Model splňující pevnostní nároky je převeden na formát pro 3D tisk a je provedena analýza voštinové výplně modelů pomocí metody konečných prvků pro nejlepší mechanické vlastnosti. Na závěr je provedena verifikace modelu s doporučeními.

Klíčová slova: princip termovize; uchycení termokamery; MKP simulace; 3D tisk; nelineární úloha; tuhost voštin

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VLČEK, Tomáš. *Design of Thermocamera Gripping for Thermoelastic Measurements: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2020, 75 p. Thesis head: Michal Kořínek.

The bachelor thesis is concerned with the design and the strength calculation of an assembly of the thermocamera gripping made by 3D print technology situated on a pillar of a biaxial pulsator. The theoretical part consists of the description of several electromagnetics laws, which are connected with the principle of thermal imaging, and explanations of function of the most used infrared sensors. The practical part contains a description of a designed gripping assembly, which is put in the strength calculation by the finite element method. The assembly meeting the strength requirements is converted into 3D print format and an analysis of infills used during the process of printing is made by the finite element method due to the best mechanical properties of every single part. In conclusion the verification of the assembly is realized including some recommendations.

Key words: principle of thermal imaging; thermocamera gripping; FEM simulation; 3D print; nonlinear task, stiffness of infill

# OBSAH

<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam použitých zkratk.....</b>	<b>12</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>13</b>
<b>2 Popis principu termovize .....</b>	<b>14</b>
2.1 Rozdělení EM záření.....	14
2.1.1 Infračervené záření .....	15
2.2 Záření černého tělesa.....	16
2.2.1 Zákony související se zářením černého tělesa .....	17
2.2.1.1 Planckův vyzařovací zákon .....	17
2.2.1.2 Wienův posouvající zákon .....	19
2.2.1.3 Stefan-Boltzmannův zákon .....	19
2.3 Detekce infračerveného záření.....	20
2.3.1 Fotodetektory .....	21
2.3.1.1 Vlastní fotorezistory .....	22
2.3.1.2 Nevlastní fotorezistory .....	22
2.3.1.3 Fotodiody.....	23
2.3.2 Tepelné detektory .....	24
2.3.2.1 Termoelektrické senzory IR záření (Seebeckův jev).....	25
2.3.2.2 Pyroelektrické senzory .....	27
2.3.2.3 Mikrobolometry.....	28
2.3.2.4 Mikro-Golayovy detektory .....	30
<b>3 Návrh konstrukce uchycení termokamery.....</b>	<b>32</b>
3.1 Původní uchycení termokamery.....	32
3.2 Požadavky pro konstrukci nového uchycení termokamery .....	33
3.3 Nové uchycení.....	34
3.3.1 Řešení požadavků .....	34
3.3.2 Popis konstrukce nového uchycení.....	35
<b>4 Simulace MKP.....</b>	<b>41</b>
4.1 Úprava výpočtového modelu .....	41
4.2 Materiál těles .....	42
4.3 Kontakty.....	42
4.4 Sít'.....	43

4.5	Okrajové podmínky.....	44
4.5.1	Vazby .....	44
4.5.2	Síly .....	45
4.6	Výsledky .....	48
4.6.1	Posunutí .....	48
4.6.2	Napětí.....	49
4.6.2.1	Držák se stupnicí .....	50
4.6.2.2	Pouzdro.....	52
4.6.2.3	Rameno.....	53
4.6.2.4	Držák termokamery .....	55
<b>5</b>	<b>Příprava CAD modelu pro 3D tisk .....</b>	<b>56</b>
5.1	Výpočet voštin .....	56
5.1.1	Voštiny vzoru grid s tryskou Ø 0,5 mm.....	56
5.1.2	Voštiny vzoru grid s tryskou Ø 0,6 mm.....	58
5.1.3	Voštiny vzoru grid s natočením o 45° s tryskou Ø 0,6 mm.....	60
5.1.4	Voštiny vzoru trojúhelník s tryskou Ø 0,6 mm .....	61
5.2	Vizualizace vytištěných součástí.....	63
<b>6</b>	<b>Verifikace prototypu.....</b>	<b>65</b>
6.1	Zlepšení mechanických vlastností.....	65
6.2	Úprava geometrie modelu .....	66
<b>7</b>	<b>Závěrečné zhodnocení .....</b>	<b>68</b>
<b>8</b>	<b>Poděkování.....</b>	<b>69</b>
<b>9</b>	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>70</b>
<b>10</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>73</b>
<b>11</b>	<b>Seznam grafů.....</b>	<b>73</b>
<b>12</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>74</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Název	Jednotka
$a$	délkový rozměr	[m]
$A_s$	plocha senzoru	[m <sup>2</sup> ]
$c$	rychlost světla	[m · s <sup>-1</sup> ]
$C_G$	referenční kapacita	[F]
$e$	Eulerovo číslo	[-]
$E_a$	aktivační energie	[J]
$E_f$	energie fotonu	[J]
$E_g$	energie na uvolnění elektronu	[J]
$E_k$	kinetická energie	[J]
$E_o$	modul pružnosti onyxu	[MPa]
$E_s$	modul pružnosti oceli	[MPa]
$f$	frekvence	[Hz]
$f_{mez}$	mezní frekvence pro fotoelektrický jev	[Hz]
$f_s$	koefficient statického tření	[-]
$F_{01}$	předpětí ve šroubu držáku termokamery	[N]
$F_{02}$	předpětí ve šroubu držáku se stupnicí	[N]
$F_{t1}$	třecí síla od předpětí $F_{01}$	[N]
$F_{t2}$	třecí síla od předpětí $F_{02}$	[N]
$F_{Gter}$	tíhová síla termokamery	[N]
$F_G$	tíhová zatěžující síla	[N]



$g$	tíhové zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
$G_s$	tepelná vodivost	$[\text{W} \cdot \text{K}^{-1}]$
$h$	Planckova konstanta	$[\text{J} \cdot \text{s}]$
$I_B$	proud v bolometru	$[\text{A}]$
$I_{\text{signal}}$	signální elektrický proud	$[\text{A}]$
$k_B$	Boltzmannova konstanta	$[\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$
$m_{\text{ter}}$	hmotnost termokamery	$[\text{kg}]$
$M$	intenzita záření	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$M_{t1}$	moment od třecí síly v důsledku předpětí šroubu držáku termokamery	$[\text{Nmm}]$
$M_{t2}$	moment od třecí síly v důsledku předpětí šroubu držáku se stupnicí	$[\text{Nmm}]$
$M_{G1}$	moment od tíhové síly vzhledem k ose šroubu držáku termokamery	$[\text{Nmm}]$
$M_{G2}$	moment od tíhové síly vzhledem k ose natáčení	$[\text{Nmm}]$
$M_\lambda$	spektrální hustota vyzařování	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}]$
$n$	index lomu	$[-]$
$q_e$	elementární náboj	$[\text{C}]$
$r_{t1}$	vzdálenost působíště třecí síly od osy šroubu držáku	$[\text{mm}]$
$r_{t2}$	vzdálenost osy šroubu držáku se stupnicí od osy natáčení	$[\text{mm}]$
$r_{G1}$	vzdálenost krajního bodu držáku termokamery od osy šroubu držáku termokamery	$[\text{mm}]$
$r_{G2}$	vzdálenost krajního bodu držáku termokamery od osy natáčení	$[\text{mm}]$

$R_B$	odpor bolometru	[ $\Omega$ ]
$R_{es}$	mez kluzu oceli	[MPa]
$R_{eo}$	mez kluzu onyxu	[MPa]
$T$	termodynamická teplota	[K]
$T_0$	počáteční termodynamická teplota	[K]
$T_s$	termodynamická teplota senzoru	[K]
$v$	rychlost	[m · s <sup>-1</sup> ]
$V_0$	napětí zdroje	[V]
$V_B$	napětí na bolometru	[V]
$V_{th}$	termoelektrické napětí	[V]
$W$	parametr pro Gollayovu buňku	[m <sup>3</sup> · K <sup>-1</sup> ]
$x$	počet	[-]
$y_{max}$	odhad maximálního celkového posunutí modelu s voštinami	[mm]
$z_1$	počáteční průhyb	[m]
$Z_f$	kvantový tok	[s <sup>-1</sup> ]

## Řecká abeceda

$\alpha_B$	teplotní součinitel elektrického odporu	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_S$	Seebeckův koeficient	[V · K <sup>-1</sup> ]
$\bar{\alpha}$	koeficient pásové absorpce	[-]
$\Delta$	znak pro změnu veličiny	[-]

$\varepsilon_0$	permitivita vakua	$[\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$
$\bar{\varepsilon}$	koefficient pásové emisivity	$[-]$
$\eta$	kvantová účinnost	$[-]$
$\theta$	zorný úhel	$[\text{rad}]$
$\lambda$	vlnová délka	$[\text{m}]$
$\lambda_0$	vlnová délka ve vakuu	$[\text{m}]$
$\lambda_{max}$	vlnová délka pro maximální $M_\lambda$	$[\text{m}]$
$\lambda_{mez}$	mezní vlnová délka pro fotoelektrický jev	$[\text{m}]$
$\mu_s$	Poissonovo číslo pro ocel	$[-]$
$\mu_o$	Poissonovo číslo pro onyx	$[-]$
$\pi$	Ludolfovo číslo	$[-]$
$\rho_s$	hustota oceli	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$\rho_o$	hustota onyxu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$\sigma_{SB}$	Stefan-Boltzmannova konstanta	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$
$\Phi_f$	zářivý tok	$[\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\Phi_o$	zářivý tok měřeného objektu	$[\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\Phi_A$	absorbovaný zářivý tok	$[\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\Phi_E$	zářivý tok prostředí	$[\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\Phi_S$	zářivý tok vyzářený senzorem	$[\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$

## Seznam použitých zkratk

EM	elektromagnetický
IR	infračervené záření (z anglického infrared radiation)
MKP	metoda konečných prvků
grid	vzor voštin
Al	chemická značka hliníku
As	chemická značka arsenu
Au	chemická značka zlata
Ba	chemická značka barya
Bi	chemická značka bismuthu
Cd	chemická značka kadmia
Ga	chemická značka galia
Ge	chemická značka germania
Hg	chemická značka rtuti
In	chemická značka india
N	chemická značka dusíku
Ni	chemická značka niklu
Pb	chemická značka olova
Pt	chemická značka platiny
Sb	chemická značka antimonu
Se	chemická značka selenu
Sn	chemická značka cínu
Te	chemická značka telluria

# 1 Úvod

Problematika této práce se týká návrhu uchycení termokamery FLUKE Ti480 PRO na sloup biaxiálního pulsátoru pro termoelastická měření.

Některé mechanické zkoušky vyžadují přítomnost termokamery nebo i dalších zařízení. Tyto zařízení je nutné nějak ustavit či přichytit tak, aby měřila co nejlépe a poskytla co nejpřesnější data z měření. V tomto případě bylo doposud používáno jednoduché uchycení, které ale neposkytovalo některé funkce, které byly při měření vyžadovány. Možným řešením by bylo použití originálního držáku termokamery od výrobce, ale tento držák je poměrně drahý, velký a už vůbec jej nejde použít pro detailní měření, jelikož by se termokamera nacházela na stojanu, který by byl ve velké vzdálenosti od pulsátoru. Proto bylo potřeba najít nové řešení, které by splnilo všechny požadavky a usnadnilo měření. Tímto řešením je návrh nového a lepšího uchycení popsaného v této práci.

Teoretickým cílem této práce je vysvětlení principu termovize včetně některých zákonů s tím souvisejících, které mi mají pomoci pochopit principy termálního snímání a navrhnout podle toho vyhovující uchycení z hlediska měření.

Praktickým cílem této práce je navrhnout a zkontrolovat pomocí metody konečných prvků nové uchycení, které bude splňovat zadané požadavky a zlepšit tak proces měření. Navržený a vyhovující model se následně vytiskne pomocí technologie 3D tisku z materiálu onyx a bude provedena verifikace prototypu.

## 2 Popis principu termovize

Pro popis principu termovizního snímání je nutné nejdříve uvést několik termínů a zákonitostí týkajících se tohoto fenoménu. Je potřeba uvést, co termovize měří a jak měřená entita vzniká a následně je možné popsat samotný princip fungování jednotlivých termovizních snímačů.

### 2.1 Rozdělení EM záření

EM záření lze charakterizovat pomocí určitých veličin. Jelikož se jedná o vlnění, jednou z veličin je právě frekvence, respektive vlnová délka. Rozdělení bude provedeno pomocí vlnové délky, jelikož frekvence nemusí být příliš vhodná pro popis. Zároveň uvažují rozdělení v prostředí s indexem lomu  $n = 1$  např. vakuum, či vzduch při zanedbání některých vlivů, protože pro jiná prostředí platí vztah:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (2.1)$$

Index lomu vyjadřuje poměr mezi rychlostí světla EM záření ve vakuu  $c$  a rychlostí šíření EM záření v jiném optickém prostředí  $v$ :

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.2)$$

Z rovnice (2.1) je patrné, že vlnová délka  $\lambda$  je nepřímo úměrná indexu lomu  $n$ , který závisí na optickém prostředí, kde všechny další prostředí po vakuu mají index lomu  $n > 1$ . [2], [3]

EM záření je tedy rozděleno podle vlnových délek následovně dle [1]:

Tab. 1 Spektrum EM záření

Název záření	Vlnová délka
rádiové záření	>1 m
mikrovlnné záření	1 m až 1 mm
infračervené záření	1 mm až 780 nm
viditelné světlo	780 nm až 380 nm
ultrafialové záření	380 nm až 10 nm
rentgenové záření (měkké i tvrdé)	10 nm až 10 pm
gama záření	<10 pm

---

<sup>1</sup> kromě prostředí záleží i na vlnové délce záření, jelikož u stejného optického prostředí mají záření různých vlnových délek různé indexy lomu

Nicméně je nutné konstatovat, že přesné hranice mezi jednotlivými spektry EM záření nejsou stanoveny a jednotlivá spektra se navzájem prolínají. Z výčtu spektra je pro tuto práci relevantní infračervené záření, jelikož toto záření přímo souvisí s předmětem termografie.[1]

### 2.1.1 Infračervené záření

Jak je popsáno v Tab. 1 infračervené záření má vlnovou délku v rozmezí od 1 mm do 780 nm. Nicméně i v této části spektra lze infračervené záření dále rozdělit na určité skupiny. Běžné rozdělení infračerveného záření je popsáno v knize Unexploded ordnance detection and mitigation [5]:

Tab. 2 Rozdělení infračerveného spektra dle [5]

Název <sup>2</sup>	Vlnová délka	Poznámka
vzdálené IR (FIR)	1000–15 $\mu\text{m}$	-
dlouhé IR (LWIR)	15–8 $\mu\text{m}$	spektrum pro termální snímání a oblast klasického tepelného vyzařování těles
střední IR (MWIR)	8–3 $\mu\text{m}$	na tomto spektru fungují tepelně naváděné zařízení
krátké IR (SWIR)	3–1,4 $\mu\text{m}$	v této oblasti fungují telekomunikační přístroje na dlouhou vzdálenost
blízké IR (NIR)	1,4–0,75 $\mu\text{m}$	toto spektrum se využívá u přenosu informací optickými vlákny, díky nízkým ztrátám. V této oblasti pracují rovněž přístroje na noční vidění

Dalším příkladem rozdělení je dle normy ISO 20473:

Tab. 3 Rozdělení infračerveného spektra dle [8]

Označení	Vlnová délka
vzdálené IR (FIR)	1000–50 $\mu\text{m}$
střední IR (MIR)	50–3 $\mu\text{m}$
blízké IR (NIR)	3–0,78 $\mu\text{m}$

<sup>2</sup> české ekvivalenty převzaty z [6]

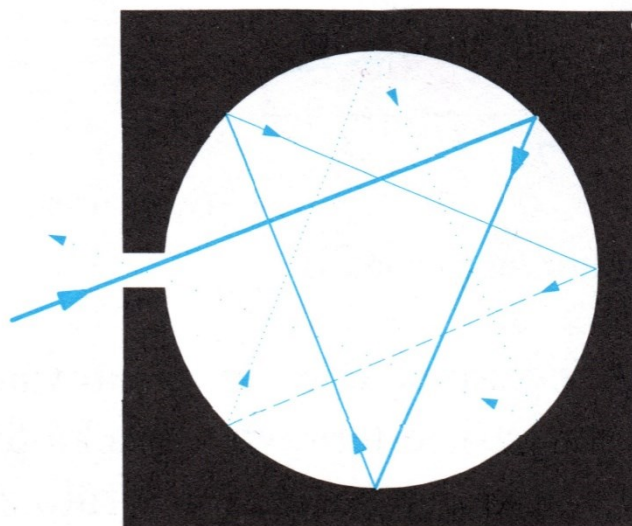
Taktéž existuje rozdělení IR záření na základě zachycení určitého spektra senzory dle [5]:

Tab. 4 Rozdělení infračerveného záření dle zachytitelnosti senzory podle [5]

Název	Vlnová délka	Senzor
vzdálené IR (FIR)	30–12 $\mu\text{m}$	příměsové křemíkové polovodiče
dlouhé IR (LWIR)	12–7 $\mu\text{m}$	HgCdTe a mikrobolometr
střední IR (MWIR)	5–3 $\mu\text{m}$	InSb, HgCdTe, PbSe
krátké IR (SWIR)	3–1 $\mu\text{m}$	blízko 1 $\mu\text{m}$ křemík, InGaAs, olovnaté soli
blízké IR (NIR)	1–0,75 $\mu\text{m}$	částečně lidské oko, křemík

## 2.2 Záření černého tělesa

Černé těleso si lze snadno představit, a to jako opravdu černé těleso, které pohltí všechno dopadající záření, což znamená, že žádné záření neodrazí (idealizovaný stav, jelikož žádné těleso není absolutně černé [8]). Takovým příkladem může být těleso takového tvaru, že se v něm záření odrazí a pohltí tolikrát, že výstupní záření lze zanedbat. [4]



Obr. 1 Znáznornění černého tělesa [2]

Každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula, respektive 0 K, emituje záření. Velikost tohoto záření závisí pouze na teplotě, a tudíž se toto záření nazývá tepelné záření. Pro černé těleso platí následující podmínky: [1]

1. černé těleso pohlcuje všechno záření nezávisle na vlnovou délku záření či směr
2. pro danou teplotu a vlnovou délku, žádné jiné těleso nemůže emitovat více záření než černé těleso
3. černé těleso emituje záření v závislosti na vlnové délce a jeho plošná zářivost  $L$  nezávisí na směru a chová se jako Lambertův zářič



## 2.2.1 Zákony související se zářením černého tělesa

Pro černé těleso platí několik zákonů, které byly objeveny na přelomu 19. a 20. století a souvisejí se vznikem nové větve fyziky, kvantové fyziky. V případě záření černého tělesa se jedná o Planckův vyzařovací zákon, Wienův posouvající zákon a Stefan-Boltzmannův zákon.[2]

### 2.2.1.1 Planckův vyzařovací zákon

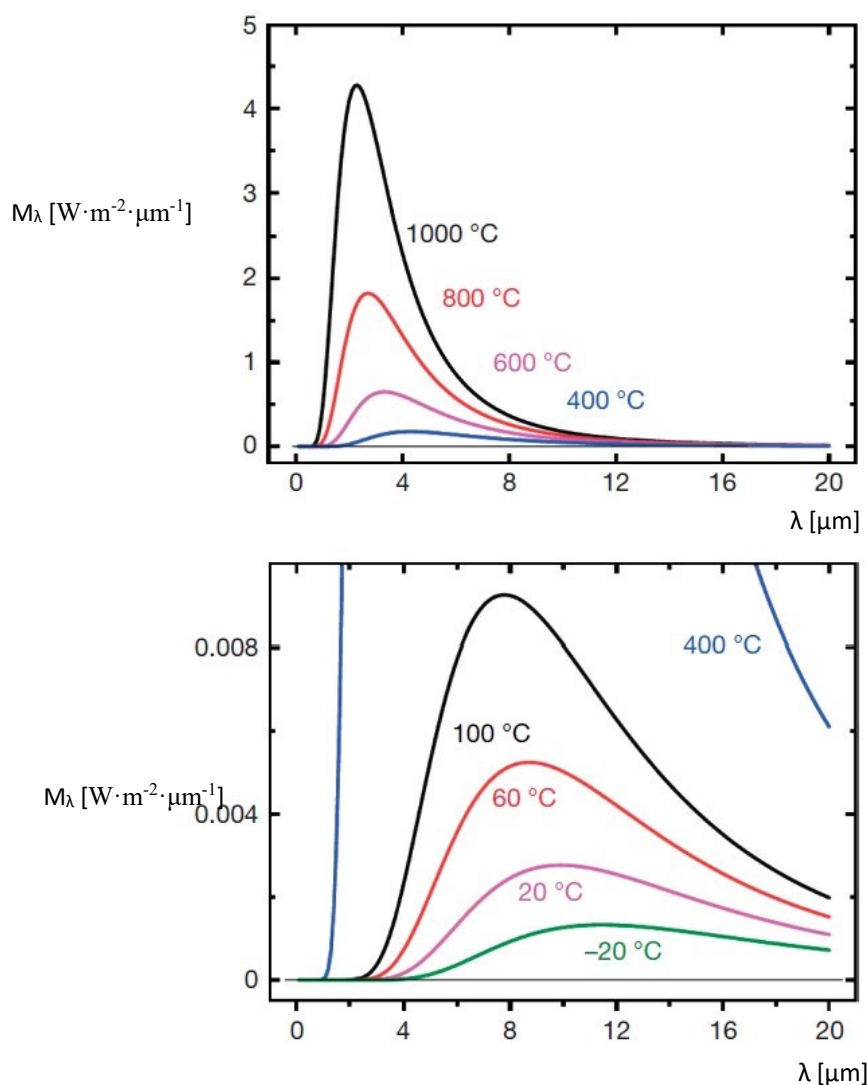
V roce 1900 německý fyzik Max Planck objasnil problematiku záření černého tělesa, přičemž zavedl předpoklad, který vybočuje z hlediska klasické fyziky. Představil si, že černé těleso je vlastně soubor elementárních elektromagnetických oscilátorů a energie těchto oscilátorů může nabývat jen určitých hodnot. Respektive, že tyto oscilátory pohlcují a vyzařují energii v dávkách zvaných kvanta. Energie tohoto kvanta je dána vztahem (2.3), který říká, že energie je přímo úměrná Planckově konstantě  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  a frekvenci  $f$  [Hz]:[2], [4]

$$E_f = h \cdot f \quad (2.3)$$

Díky tomu odvodil vyzařovací zákon, který popisuje závislost spektrální hustoty vyzařování  $M_\lambda$  na teplotě  $T$  a intervalu vlnové délky  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ : [1]

$$M_\lambda(T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} d\lambda \quad (2.4)$$

Funkce spektrální hustoty vyzařování, má pro určité teploty  $T$  následující průběh v závislosti na vlnové délce:



Obr. 2 Závislost spektrální hustoty vyzařování v závislosti na vlnové délce pro konkrétní teploty (nejedná se o konkrétní průběhy a hodnoty na svislé ose jsou čistě srovnávací) [1]

Z grafu jde jasně poznat, že těleso vyzařuje spojité spektrum elektromagnetického záření. Dalším poznatkem je, že hodnota spektrální hustoty vyzařování roste v závislosti na teplotě tělesa, přičemž v určitém bodě dochází k maximu vyzařování. Z průběhu lze také vyčíst, že nižší teploty tělesa vedou k delším vlnovým délkám, kdežto vysoké teploty ke kratším). Od určité vysoké teploty (stovky stupňů Celsia) může dojít k tomu, že spektrální hustota vyzařování pro danou teplotu bude mít vyšší hodnotu v oblasti viditelných vlnových délek, která již překročí, vzhledem k okolním světelným podmínkám, minimální viditelnost pouhým okem<sup>3</sup>, a horké těleso nebude mít již klasickou barvu, ale bude se jevit červeně popřípadě žlutě či bíle v závislosti na teplotě a bude z něj cítit žár. Typickým příkladem

<sup>3</sup> subjektivní vjem

může být rozžhavené uhlí, klasická wolframová žárovka, která na tomto principu funguje, či Slunce.[1]

### 2.2.1.2 Wienův posouvající zákon

Jak již bylo naznačeno v kapitole 2.2.1.1, spektrální hustota vyzařování je funkcí, která má pro určitou vlnovou délku či frekvenci své maximum. Toto maximum popisuje Wienův posouvající zákon jako:

$$\frac{dM_\lambda(T)}{d\lambda} = 0 \quad (2.5)$$

Po výpočtu se dostává vztah:

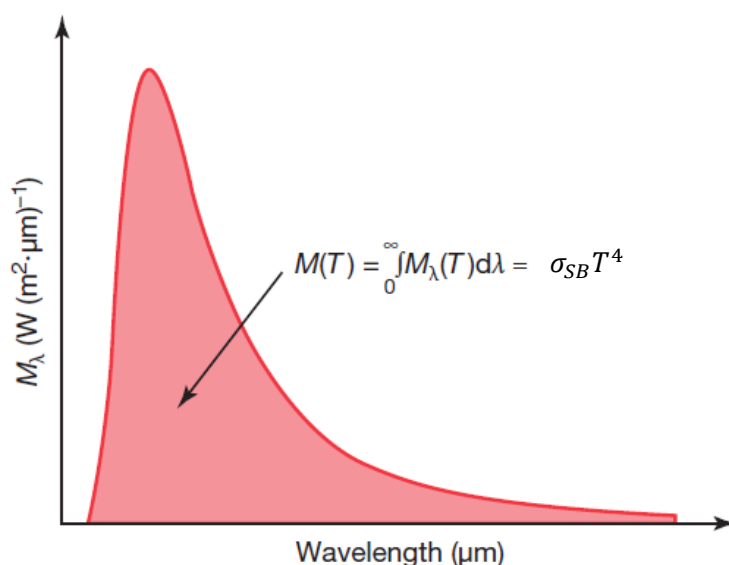
$$\lambda_{max} \cdot T = konst. = 2\,897,8 \, \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2.6)$$

Ze vztahu poté lze odvodit, jaké záření (o jaké vlnové délce) bude vydávat těleso při určitých teplotách. Např. pro teplotu  $T = 300 \, \text{K}$  (přibližná teplota prostředí) odpovídá vlnová délka  $\lambda = 10 \, \mu\text{m}$ . [1]

### 2.2.1.3 Stefan-Boltzmannův zákon

Intenzitu záření  $M$  lze rovněž určit z Planckova vyzařovacího zákona, přičemž nezáleží na interpretaci. Každopádně intenzitě záření zůstane závislost na teplotě  $T$ . Pro řešení se uvažuje celé EM spektrum. [1]

$$M(T) = \int_0^\infty M_\lambda(T) d\lambda = \sigma_{SB} \cdot T^4 \quad (2.7)$$



Obr. 3 Vizualizace Stefan-Boltzmannova zákona [1]

$\sigma_{SB}$  představuje Stefan-Boltzmannovu konstantu, která má hodnotu  $\sigma_{SB} = 5,67 \cdot 10^{-8} \, \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ . [1]

Oblast pod grafem distribuční křivky spektrální hustoty vyzařování  $M_\lambda(T)d\lambda$  značí hustotu záření  $M(T)$ , která závisí čistě na teplotě objektu.[1]

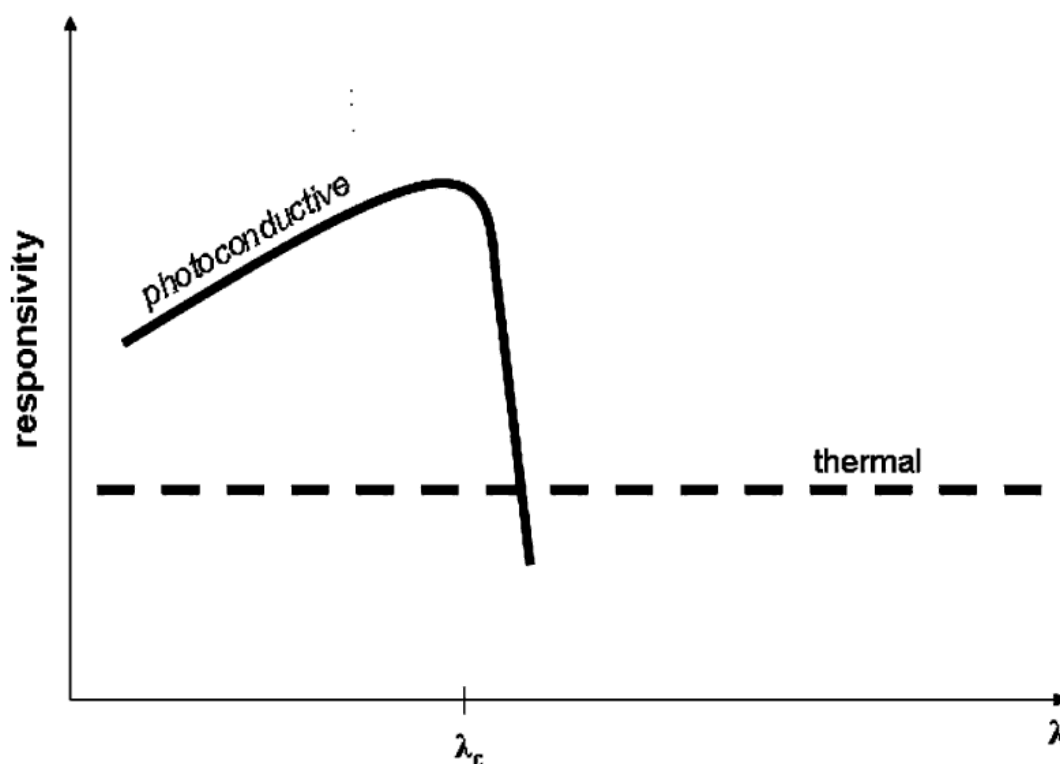
## 2.3 Detekce infračerveného záření

Detektor infračerveného záření funguje na principu přeměny záření na elektrickou složku. Detekci lze provádět dvěma způsoby. Prvním z nich je detekce fotonů a druhý detekce tepla. [9]

Fotonové detektory (též fotodetektory nebo kvantové detektory), fungují na principu jednokrokové změny. Kdy dopadající foton změní přímo elektrické vlastnosti detektoru. Z tohoto hlediska se dělí na fotokonduktivní detektory (též fotorezistory) a fotodiody. Princip fungování těchto fotodetektorů je vysvětlen v kapitole 2.3.1.[5][9]

Tepelné detektory fungují na principu dvoukrokové změny, kdy záření nejprve zahřeje senzor, který následkem toho změní jeden z parametrů jako např. elektrickou vodivost, tlak plynu nebo schopnost termální polarizace. [9]

Na rozdíl od fotonových detektorů jsou tepelné detektory schopny fungovat v celém vlnovém rozsahu za konstantní citlivosti. Nicméně tato pozitivní vlastnost je vykoupena sníženou citlivostí na celém měřicím intervalu viz Obr. 4. Další vlastností je, že termální detektory jsou schopny pracovat za pokojové teploty, nicméně odezva celého mechanismu je delší než v případě fotodetektoru, z důvodu zahřátí patřičného senzoru. [5]



Obr. 4 Srovnání citlivosti fotodetektoru a tepelného detektoru v závislosti na vlnové délce elektromagnetického záření. [5]

### 2.3.1 Fotodetektory

Fotodetektory nejčastěji fungují na principu fotoelektrického jevu<sup>4</sup>. To je jev, při kterém má foton takovou energii, že je schopen uvolnit elektron ve valenční vrstvě a vytvořit z něj vodivostní elektron, případně pár elektron-díra. Ze zákona zachování energie samozřejmě plyne, že při takovém jevu buďto foton předá celkovou energii elektronu a ten se kromě uvolnění může dále pohybovat určitou rychlostí závislé na velikosti energie fotonu, nebo foton předá jen část energie a uvolní elektron a foton bude dále existovat, nebo se může stát, že foton nebude mít dostatek energie a k uvolnění elektronu nedojde, jelikož pro emisi elektronu je nutná určitá minimální energie  $E_g$ . Ta se dá popsat následující rovnicí:[3], [14]

$$E_f = E_g + E_k \quad (2.8)$$

Bude-li se uvažovat čistě jen energie pro uvolnění elektronu (výstupní energie), rovnice (2.8) bude vypadat následovně:[14]

$$E_f = E_g \quad (2.9)$$

Přičemž aplikuje-li se Planckův zákon (rovnice (2.3)):[14]

$$h \cdot f_{mez} = E_g \quad (2.10)$$

$f_0$  značí mezní frekvenci, pro kterou se fotoelektrický jev uskuteční. Pokud bychom chtěli stanovit mezní vlnovou délku, rovnice (2.10) se upraví do následujícího tvaru:[14]

$$\lambda_{mez} = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (2.11)$$

Jestliže vycházíme ze základních radiometrických veličin, je nutno uvažovat, že nelze počítat jen s jedním fotonem, nýbrž je nutné brát v úvahu celý zářivý tok, který je schopen fotoelektrického jevu  $\Phi_f$ . Dále se definuje veličina zvaná kvantový tok  $Z_f$  [ $s^{-1}$ ]. Tato veličina vychází z upraveného vztahu pro zákon zachování energie:[1]

$$Z_f = \frac{\Phi_f}{h \cdot f} = \lambda \cdot \frac{\Phi_f}{h \cdot c} \quad (2.12)$$

Dá se říci, že fotodetektor se v podstatě chová jako počítadlo fotonů, kdy počet interagujících fotonů vyvolává uvolnění elektronů. Počet fotonů za čas představuje právě kvantový tok  $Z_f$ . Z předchozích znalostí lze určit velikost signálního elektrického proudu  $I_{signal}$ , jelikož elektrický proud je velikost elektrického náboje za čas, kdy elektrický náboj zde představuje množství elektronů, které byly uvolněny zářivým tokem. Pak velikost proudu lze napsat jako:

$$I_{signal} = q_e \eta Z_f \quad (2.13)$$

---

<sup>4</sup> existují i další typy fotodetektorů fungující na jiných kvantových jevech, nicméně jejich použití v praxi související s měřením infračerveného záření je minimální

$\eta$  zde představuje kvantovou účinnost vyjadřující množství volných nosičů s nábojem pro interagující foton.[1]

Jak již bylo naznačeno v kapitole 2.3, fotodetektory se dělí na několik skupin:[5]

1. Vlastní fotorezistory
2. Nevlastní fotorezistory
3. Fotodiody

### 2.3.1.1 Vlastní fotorezistory

Vlastní fotorezistory mají tu vlastnost, že absorpce fotonů probíhá jen mezi pásovými přechody, respektive foton vybudí valenční elektron přímo do vodivého pásma, po němž zůstane díra. Vybuzení se zde řídí zákonem popsáním rovnicí (2.9), kde je nutné aplikovat ionizační energii, pro uvolnění fotonu z valenční vrstvy do vodivé. Tím dojde ke snížení odporu a opačně naroste vodivost, která se vyhodnotí.[1], [10]

Mezi vlastní fotorezistory se řadí látky jako  $\text{Hg}_x\text{Cd}_x\text{Te}$ ,  $\text{Pb}_x\text{Sn}_x\text{Te}$ ,  $\text{Pb}_x\text{Sn}_x\text{Se}$ , kde pro různá  $x$  (přirozená čísla) má látka jinou mezní frekvenci, respektive mezní vlnovou délku.[5]

Názorněji tuto problematiku přibližuje Obr. 5.

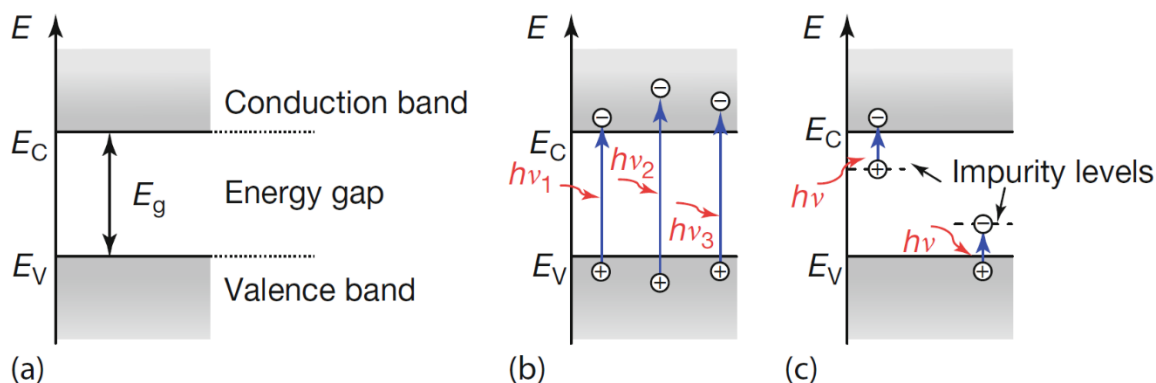
### 2.3.1.2 Nevlastní fotorezistory

Nevlastní fotorezistory jsou založeny na formě příměsového prvku, který poskytuje volný elektron a jedná se o polovodič typu N, či ho naopak neposkytuje a jedná se polovodič typu P. Pro bližší vysvětlení bude použit polovodič typu N, který poskytuje volný elektron. [1], [3]

Jelikož vlivem jiného prvku dojde k narušení orbitalů, elektron základního prvku poté potřebuje méně energie na uvolnění se z valenční vrstvy základního atomu, jelikož může přeskočit do valenční vrstvy příměsového atomu. To samé platí pro elektron příměsového prvku, který se taktéž může uvolnit z valenční vrstvy příměsového atomu do vodivostní vrstvy základního atomu. Díky tomu je potřeba tedy méně výstupní energie a klesá tím i mezní vlnová délka záření, schopné uvolňovat elektrony. Díky tomuto jevu stejně jako v případě vlastních fotorezistorů dojde ke snížení elektrického odporu a dojde ke zvýšení vodivosti, což se vyhodnocuje a získávají se tak data o teplotě. [10]

Mezi nevlastní fotorezistory patří látky Ge, Ge-Si, InSb, GaAs. Nejzajímavějším prvkem je právě germanium (Ge), které může mít různých druhů příměsí, které poté ovlivňují mezní vlnovou délku. Pro názornost uvádím několik materiálů: Ge - Au (9  $\mu\text{m}$ ), Ge - Hg (14  $\mu\text{m}$ ), Ge - Cd (23  $\mu\text{m}$ ), Ge - In (105 $\mu\text{m}$ ), Ge - Sb (125  $\mu\text{m}$ ). [5]

Grafické znázornění je na Obr. 5.

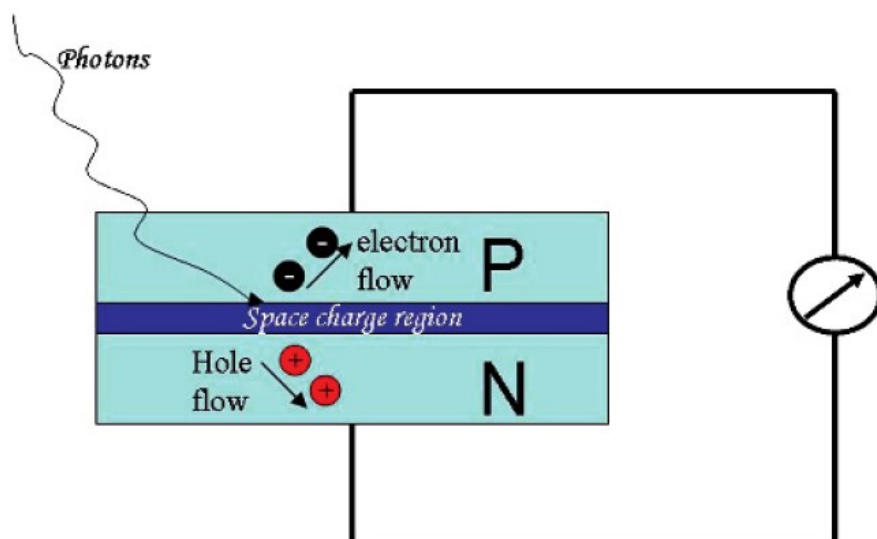


Obr. 5 (a) Znázornění jednotlivých pásem podle energetické struktury elektronového obalu. (b) Ukázka fungování vlastního fotorezistoru. (c) Ukázka fungování nevlastního fotorezistoru. [1]

### 2.3.1.3 Fotodiody

Fotodiody jsou stejně jako předchozí typy fotodetektorů polovodičové součástky a fungují na téměř stejném principu, co se týče fotorezistorů, jelikož i zde je princip založen na fotoelektrickém jevu. Fotodiody v sobě obsahují P-N přechod, též zvaný jako hradlová vrstva. Ta vzniká v důsledku rekombinace elektronů z N části a děr z P části. Je široká cca.  $1\ \mu\text{m}$  a má kolem sebe elektrické pole, které brání další rekombinaci. A právě hradlová vrstva je klíčovým prvkem pro detekci infračerveného záření. [3]

Fotodioda se rovněž může chovat jak fotorezistor, pokud je připojena k externímu zdroji napětí, jelikož s osvětlením mění svůj odpor. Nicméně v tomto případě se jedná čistě o fotovoltaický článek. Než se přejde ke konkrétnímu vysvětlení, je nutné definovat pojem difúzní délka, což je vzdálenost, kterou urazí elektron či díra, než se rekombinuje se svým protějškem. Neboť aby fotovoltaický jev nastal, je nutné, aby dopadající foton IR záření vytvořil pár elektron-díra buďto přímo v hradlové vrstvě, nebo nejdále difúzní délku od ní. V tom případě vznikne již zmíněný pár elektron-díra. Z důvodu elektrického pole vytvořeného hradlovou vrstvou se díra pohybuje do N části a elektron do části P, což má za následek vznik elektrického proudu, který je dán rovnicí (2.13). Elektrický proud (popřípadě elektrické napětí) se měří, vyhodnocuje a následně je na základě vyhodnocení stanovena teplota měřeného tělesa. [1], [3], [10], [14]



Obr. 6 Znáznornění principu fotodiody, kdy dopadající foton generuje elektrický proud, detekovaný galvanometrem (napravo). [5]

### 2.3.2 Tepelné detektory

Jak bylo naznačeno v úvodu kapitoly 2.3 Detekce infračerveného záření, tepelné detektory fungují na principu zahřátí, čímž se ovlivní nějaká veličina, kterou je schopno vyhodnotit. Mezi tyto veličiny se řadí hlavně elektrické veličiny jako napětí a proud. [9]

Ačkoli jsou tepelné detektory založeny na různých principech převodu IR záření na elektrický signál, všechny mají stejný základ. IR záření dopadá na tepelně izolovaný dobře absorbující element (pixel). Teplota pixelu je pak přímo úměrná pohlcenému záření, čímž je senzor v podstatě nezávislý na snímané vlnové délce, jak je patrné z Obr. 4. Každopádně existují případy, kdy absorpce je závislá na vlnové délce, přičemž záleží na vlastnostech použitého pixelu. Pixel pak může převádět tepelnou energii na elektrický signál dvěma způsoby. První způsob je termoelektrický převodník a druhý způsob je parametrický převodník, převádějící teplotu na elektrický signál. [9]

Mezi termoelektrické převodníky patří detektory založené na Seebeckově jevu a pyroelektrickém jevu. Mezi parametrické převodníky patří senzory založené na vztahu mezi elektrickým odporem a teplotou (bolometry) a vztahem mezi tlakem v uzavřeném objemu na teplotě (Golayův detektor). [5], [9]

Ve všech případech se vychází ze vztahu, že absorbovaný zářivý tok  $\Phi_A$  se skládá ze zářivého toku měřeného objektu  $\Phi_O$  a zářivého toku prostředí  $\Phi_E$ . Jelikož měření probíhá v určitém pásmu, je výsledná hodnota upravena o koeficient pásové absorpce  $\bar{\alpha}$ . [1]

$$\Phi_A = \bar{\alpha}(\Phi_O + \Phi_E) \quad (2.14)$$

Zároveň dojde k vyzáření energie senzorem z důvodu Stefan-Boltzmannova zákona, ale opět pro určité pásmo: [1]

$$\Phi_S = \bar{\epsilon} \sigma_{SB} T_S^4 A_S \quad (2.15)$$



Dále musí dojít k bilanci mezi zářivým tokem absorbovaným a vyzářeným:[9]

$$\Delta\Phi_S = A_S \sigma_{SB} (T_S^4 - T_E^4) \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (2.16)$$

kde  $\theta$  představuje zorný úhel.

Následně vztah pro změnu teploty senzoru je: [9]

$$\Delta T_S = \frac{\bar{\alpha} \Delta\Phi_S}{G_S} \quad (2.17)$$

kde  $G_S$  je tepelná vodivost. A právě tento vztah je, co se týče z hlediska měření, velice důležitý, poněvadž jsou na něm postaveny všechny tepelné detektory. [9]

### 2.3.2.1 Termoelektrické senzory IR záření (Seebeckův jev)

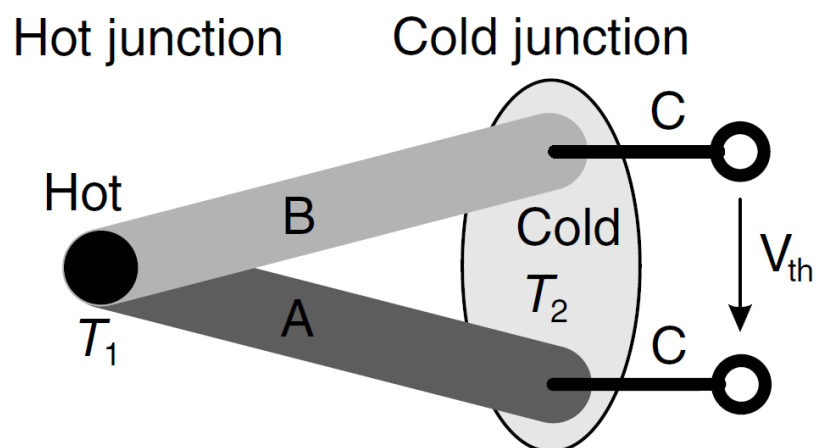
Termoelektrické senzory IR záření měří termoelektrické napětí  $V_{th}$  vzniklé v důsledku změny teploty popsané rovnicí (2.17). Změna teploty je vztažena ke dvěma bodům, kdy jeden bod, v tomto případě pixel, má jinou (vyšší) teplotu než referenční bod. Mezi body o různých teplotách tak vzniká elektrické napětí vyjádřené vzorcem:

$$V_{th} = \alpha_S \Delta T_S \quad (2.18)$$

$\alpha_S$  zde představuje Seebeckův koeficient, který má různou hodnotu pro různé materiály.[9]

Princip Seebeckova termoelektrického jevu je založen na tepelném pohybu částic, v tomto případě pohybu částic s nábojem, hlavně elektronů. Tento jev si lze představit na experimentu, kdy se spojí dva vodiče z různých materiálů. Ve spoji vznikne z důvodu rozdílných potenciálů malá kontaktní napětí. Jsou-li teploty obou vodičů stejné, kontaktní napětí se vyruší vzhledem k potenciálovému spádu. Nicméně bude-li se jeden vodič zahřívat a druhý bude ponecháván na stejné teplotě, kontaktní napětí se zvětší a lze jej změřit a, když je přítomno elektrické napětí, tak celým obvodem bude procházet elektrický proud. [3], [9]

Nemusí ovšem platit, že oba vodiče musí mít v různých místech rozdílné teploty. Vodiče mohou být zahřívány v místě spoje, přičemž na druhém konci jsou chlazeny. To rovněž vytváří teplotní gradient a vzniká napětí. Lépe tento fenomén přibližuje Obr. 7.[9]



Obr. 7 Demonstrace Seebeckova jevu na vodičích se zahřátím na společném styku (černá tečka) na teplotu  $T_1$  a s chlazením na svém druhém konci s teplotou  $T_2$ , kde je rovněž měřeno termoelektrické napětí  $V_{th}$ . Tento celek se celý označuje jako termočlánek [9]

O tom, jak velké napětí vznikne, záleží na materiálu a teplotním gradientu. Bude-li se uvažovat konstantní teplotní gradient z důvodu měření, jelikož předpoklad vede k tomu, že chladný spoj bude neustále chlazen na určitou teplotu a měřený objekt bude rovněž mít stejnou teplotu a vyzařovat stále stejné IR záření, pak jediná proměnná je Seebeckův koeficient. Ten z hlediska hodnoty nezávisí na teplotě, ale čistě na použitých materiálech vodičů, respektive kombinaci. Příspěvek jednotlivých materiálů na hodnotu napětí ukazuje Tab. 5 pro teplotní gradient  $\Delta T_S = 100$  K. [9]

Tab. 5 Termoelektrické napětí za teploty 273 K a teplotním gradientu 100 K [9]

<b>Materiál</b>	$V_{th}$ [mV]	<b>Materiál</b>	$V_{th}$ [mV]
tellurium	+50	platina	0
nikl-chrom	+2,2	sodík	-0,21
železo	+1,88	nikl	-(1,94÷1,2)
kadmium	+(0,85÷0,92)	konstantan	-(3,47÷3,04)
měď	+(0,72÷0,77)	bismut	-7
zlato	+(0,56÷0,8)		

Bude-li se uvažovat čistě hodnota Seebeckova koeficientu, pak jsou hodnoty uvedeny v Tab. 6. Jak může tabulka napovídat, termoelektrický jev se nemusí uskutečňovat čistě mezi kovy, a tedy kovovými spoji, nýbrž i polovodiči. [9]

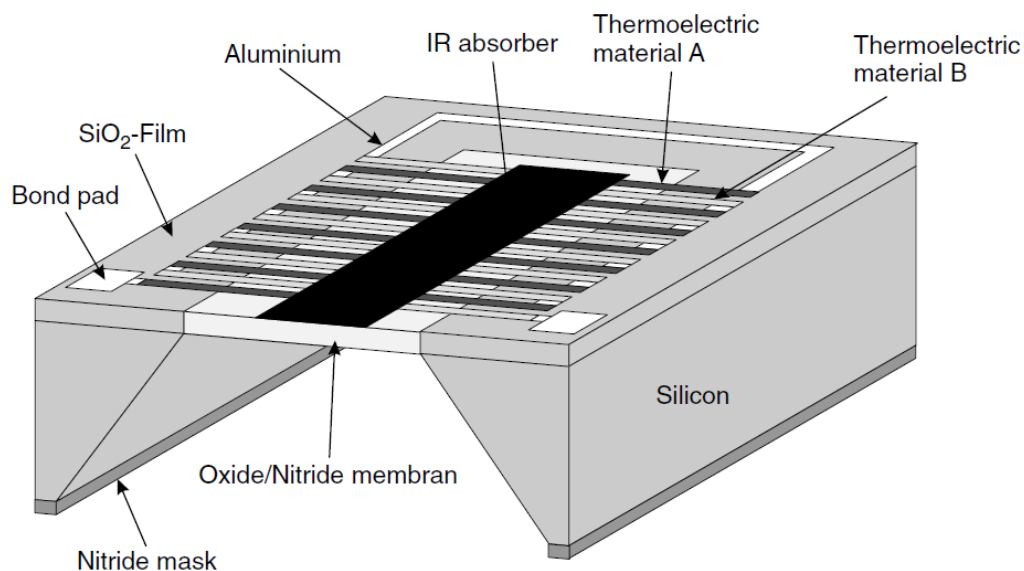
Tab. 6 Hodnoty Seebeckových koeficientů pro polovodiče a kovy. N znamená polovodič typu N, P polovodič typu P, poly – polykrystalický. [9]

Polovodič	$\alpha_S [\mu V \cdot K^{-1}]$	Polovodič	$\alpha_S [\mu V \cdot K^{-1}]$
Si	– 450	Bi	– 65
N-Si	– (100÷800)	P-Bi <sub>0,5</sub> Sb <sub>1,5</sub> Te <sub>3</sub>	+ 230
N-poly-Si	– (100÷500)	N-Bi <sub>0,87</sub> Sb <sub>0,13</sub>	– 100
P-Si	+ (100÷800)	PbTe	– 170
P-poly-Si	+ (100÷500)	Bi <sub>1,8</sub> Sb <sub>0,2</sub> Te <sub>2,7</sub> Se <sub>0,3</sub>	– 220
Ge	+ 420	Sb	+ 35
Kov	$\alpha_S [\mu V \cdot K^{-1}]$	Kov	$\alpha_S [\mu V \cdot K^{-1}]$
Al	– 3,2	Ni	– 20,2
Au	+ 0,1	Pt	– 3,2

Výsledné měřené napětí pro dva různé materiály s obecným označením A, B při sériovém zapojení  $x$  termočlánků se pak stanoví: [9]

$$V_{th} = x (\alpha_{S,A} - \alpha_{S,B}) \Delta T_S \quad (2.19)$$

Termoelektrický senzor pak vypadá následovně:



Obr. 8 Struktura termoelektrického senzoru. Černý pás představuje absorbent, k němuž jsou připojeny termočlánky. [9]

### 2.3.2.2 Pyroelektrické senzory

Pyroelektrické senzory spadají pod piezoelektrické senzory, které fungují téměř na stejném principu. Senzory využívají elektrickou polarizaci, kdy na jedné straně tělesa

vznikne kladný pól a na opačné záporný. Polarizace se může vyskytnout buďto v elektrickém poli (takto se například chová voda), nebo se může jednat o vlastní polarizaci. Pyroelektrické senzory fungují na principu vlastní polarizace, která je závislá na teplotě. Se změnou teploty tudíž dochází k vytvoření náboje, který se dá měřit a vyhodnotit. Tento jev se nazývá primární pyroelektrický jev. V tomto případě platí závislost, že s rostoucí teplotou roste i velikost generovaného náboje. [2], [9]

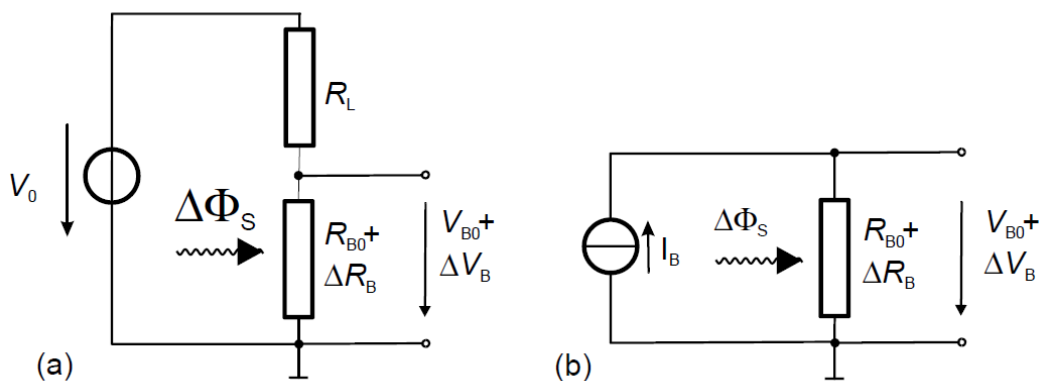
Každopádně jak bylo naznačeno dříve, pyroelektrické senzory spadají pod piezoelektrické materiály. V tom důsledku dochází vlivem teploty i k deformaci struktury senzoru, čímž dojde ke změně mechanického tlaku  $T_m$ . Tím dochází ke změně elektrické indukce v důsledku piezoelektrického chování. Tento jev se nazývá sekundární pyroelektrický jev. [9]

V důsledku toho se může měřit a vyhodnocovat změna dielektrické pevnosti (při nulové elektrické indukci), kdy se měří velikost napětí potřebná pro vodivost v důsledku změny vnitřní struktury způsobené zahřátím. Nebo se může měřit změna elektrické indukce vlivem zahřátí. [9]

Mezi materiály používané k výrobě pyroelektrických senzorů patří monokrystaly triglycínsulfát (TGS), deuterovaný triglycínsulfát (DTGS),  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ . Z keramiky to je  $\text{PbZr}_x\text{Ti}_x\text{O}_3$  (PZT), poté sloučenina Ba Sr Ti (BST) nebo Pb Sc Ta (PST). Pyroelektrické vlastnosti mohou mít i polymery, konkrétně se jedná o polyvinylidenfluorid (PVDF). Nevýhodou většiny těchto materiálů je jejich pracovní teplota, jelikož kromě  $\text{LiNbO}_3$  a  $\text{LiTaO}_3$  se všechny pohybují v desítkách Kelvinů a vyžadují silné chlazení. Pro  $\text{LiTaO}_3$  činí pracovní teplota 603 K a pro  $\text{LiNbO}_3$  dokonce 1480 K. [5], [9]

### 2.3.2.3 Mikrobolometry

Mikrobolometry, případně bolometry, jsou elektrotechnické součástky, které mění svůj odpor v závislosti na své teplotě. Při změně teploty senzoru  $\Delta T_S$  se změní odpor bolometru na  $R_B$ . Na základě změny odporu se měří změna napětí na bolometru  $\Delta V_B$ , buďto při známé hodnotě elektrického napětí zdroje  $V_0$ , nebo proudu  $I_B$ , v závislosti na konstrukci elektrického obvodu (viz. Obr. 9). [3]



Obr. 9 Ukázka schémat zapojení (a) s předřadným rezistorem a konstantním zdrojovým napětím (b) jednoduché zapojení při konstantním elektrickém proudu [9]

Změna odporu senzoru je daná existencí závislosti elektrického odporu materiálu na teplotě vyjádřena teplotním součinitelem elektrického odporu  $\alpha_B$ . Teplotní součinitel elektrického odporu  $\alpha_B$  se dá vyjádřit následovně: [3], [9]

$$\alpha_B = \frac{1}{R_B} \frac{dR_B}{dT_S} \quad (2.20)$$

Pro kovy následně platí přímá závislost mezi odporem a teplotou, která se dá vyjádřit: [3]

$$R_B(T) = R_B(T_0) \cdot (1 + \alpha_B \Delta T_S) \quad (2.21)$$

kde  $R_B(T_0)$  představuje velikost odporu vztaženou k určité teplotě.

U polovodičových součástí závisí odpor na zaplnění vodivostního pásu nosiči náboje. Při nízkých teplotách v desítkách Kelvinů je vodivostní pás prázdný. Se zvyšující se teplotou téměř hyperbolicky klesá rezistivita, protože se zvyšujícím se pohybem atomů kolem rovnovážných poloh dochází k uvolnění elektronů do vodivostního pásu. Odpor polovodiče se pak stanoví: [4], [9]

$$R_B(T) = R_B(T_0) e^{\frac{E_a}{k_B \cdot T_S}} \quad (2.22)$$

$E_a$  představuje aktivační energii, kterou je potřeba dodat elektronu z valenčního pásu, aby se stal vodivostním. Pokud se tento vztah bude chtít převést na závislost na teplotním součiniteli elektrického odporu, použijí rovnici (2.20) a získávají: [9]

$$\alpha_B = \frac{1}{R_B} \frac{dR_B(T_S)}{dT_S} = - \frac{E_a}{k_B \cdot T_S^2} \quad (2.23)$$

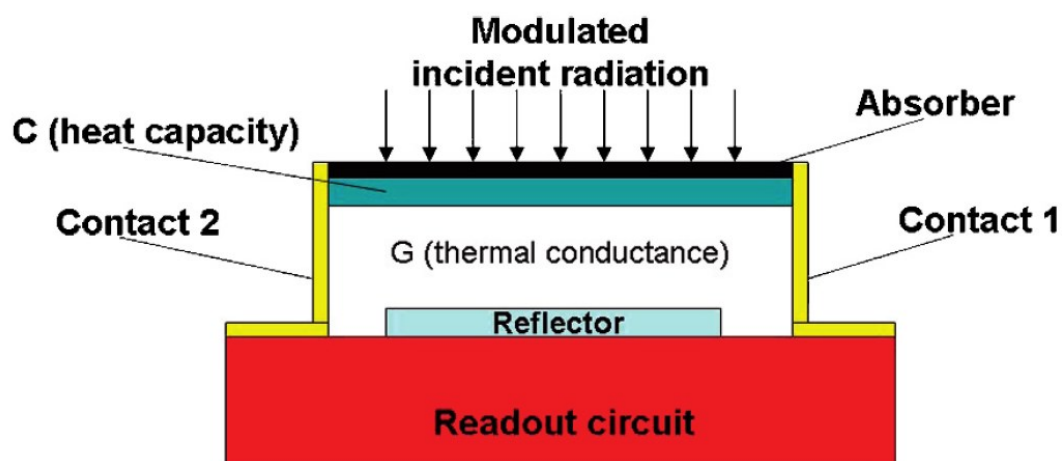
Poté lze vztah (2.22) upravit na: [9]

$$R_B(T) = R_B(T_0) e^{\alpha_B T_S} \quad (2.24)$$

Hodnoty teplotních součinitelů elektrického odporu materiálů, ze kterých jsou nejčastěji vyráběny bolometry ukazuje Tab. 7.

Tab. 7 Hodnoty teplotních součinitelů elektrického odporu pro vybrané materiály [9]

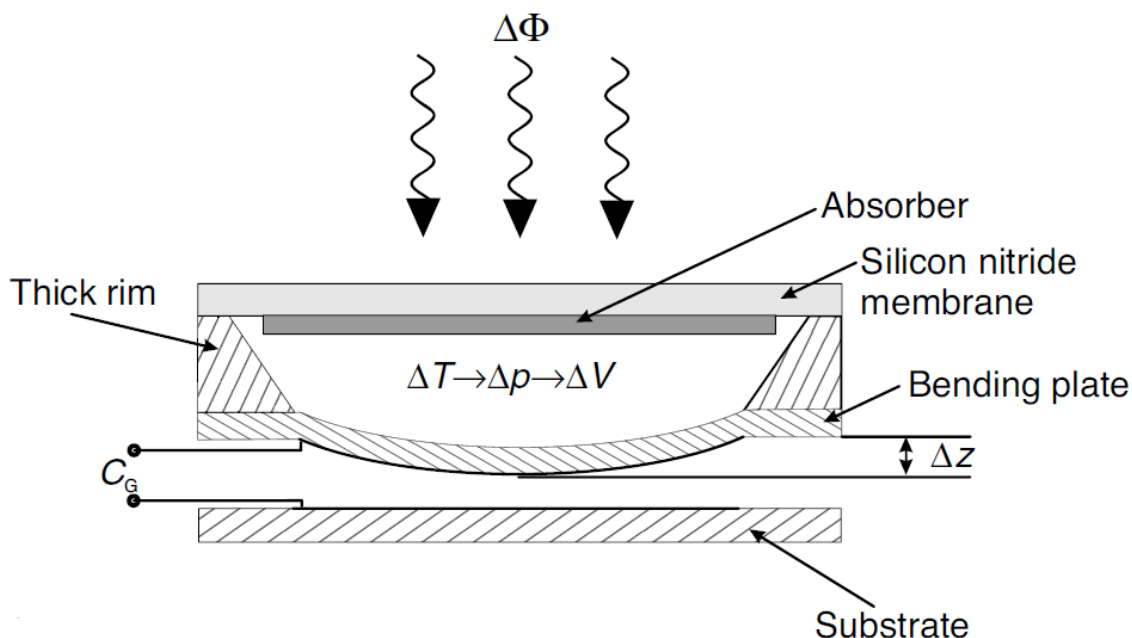
Kovy		Polovodiče	
Materiál	$\alpha_B$ [K <sup>-1</sup> ]	Materiál	$\alpha_B$ [K <sup>-1</sup> ]
Ag	$3,8 \cdot 10^{-3}$	oxidy vanadu	$-27 \cdot 10^{-3}$
Al	$3,9 \cdot 10^{-3}$	Ni-Co-Mn oxidy	$-40 \cdot 10^{-3}$
Au	$3,4 \cdot 10^{-3}$	YBaCuO	$-35 \cdot 10^{-3}$
Cu	$3,9 \cdot 10^{-3}$	GaAs	$-90 \cdot 10^{-3}$
Ni	$6,0 \cdot 10^{-3}$	amorfní-Si	$-30 \cdot 10^{-3}$
Ni-Fe (tenký)	$2,3 \cdot 10^{-3}$	amorfní-Ge	$-21 \cdot 10^{-3}$
Pt (tenký)	$1,8 \cdot 10^{-3}$	poly-Si:Ge	$-14 \cdot 10^{-3}$



Obr. 10 Zjednodušená podoba bolometru. Absorpční plocha je doplněna o tepelný kapacitor k lepšímu ohřevu senzoru a pod ním se nachází zrcadlo, pro odraz vyzařovaného záření. [5]

#### 2.3.2.4 Mikro-Golayovy detektory

Golayův detektor funguje na principu deformace desky způsobené nárustem tlaku uvnitř buňky. Detektor se skládá z absorbentu (např. tenký plátek Pt), který je připevněn na plátku vyrobeném ze Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>. Následuje buňka vyplněná plynem a tato buňka je uzavřena dalším plátkem, např. ze Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, který se může prohýbat. Spodní část plátku je pokovena včetně protější oblasti. Pro lepší názornost přikládám Obr. 11. [9]



Obr. 11 Schéma Golayova detektoru

Dopadající záření je pohlceno vrchní vrstvou, která se zahřeje. Svým zahřátím způsobí i zahřátí plynu, který tím následkem zvyšuje svůj tlak a mění objem v důsledku deformace spodního plátku. Spodní plátek se prohýbá směrem dolů, čímž mění elektrickou kapacitu  $C_G(T)$ , která se následně vyhodnocuje. [9]

Pro referenční kapacitu platí:

$$C_G = \varepsilon_0 \cdot \frac{a^2}{z_1} \quad (2.25)$$

Změna kapacity se pak stanoví s pomocí parametru  $W$  jako:

$$\Delta C_G = \frac{\varepsilon_0}{z_1^2} W \Delta T \quad (2.26)$$

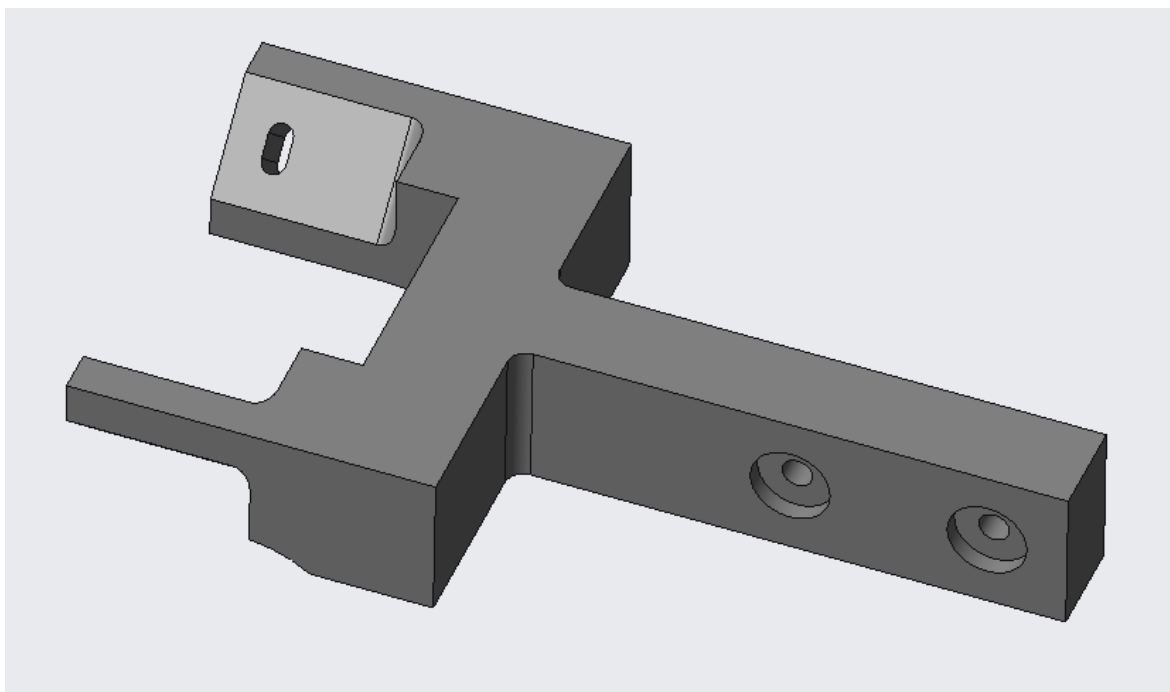
A právě změna elektrické kapacity je jev, který se následně vyhodnocuje.[9]

### 3 Návrh konstrukce uchycení termokamery

Termokamera byla doposud uchycena pomocí jednoduchého držáku, nicméně bylo nutné jej nahradit lepším držákem.

#### 3.1 Původní uchycení termokamery

Při návrhu konstrukce uchycení termokamery vycházím z geometrie původního držáku znázorněného na Obr. 12 a Obr. 13.



Obr. 12 Původní model držáku termokamery, CAD model



Obr. 13 Fotografie původního držáku termokamery včetně voštin



Původní držák je zhotoven metodou 3D tisku stejně jako objímka, ke které je připevněn pomocí 2 šroubů M5. Objímka je poté připevněna na sloup biaxiálního pulsatoru INOVA100kN/1000N.



Obr. 14 Biaxiální pulsator na jehož sloupu je připevněn držák termokamery.

Zdroj: <https://www.labcontrol.cz/multi-ax/multi-ax.html>

Tento stroj slouží zejména pro realizaci únavových či kvazistatických zkoušek při proporcionálním i neproporcionálním namáhání vzorků. U termoelastických měření, při nichž je nutné měřit i teplotu vzorku, je potřeba mít v blízkosti vzorku termokameru. Jelikož originální držák je poměrně drahý a nesplňuje podmínku blízkosti, bylo nutné dříve zmíněné jednoduché řešení. Nicméně i tento model je nutné nahradit novým držákem.

### 3.2 Požadavky pro konstrukci nového uchycení termokamery

Při návrhu nového držáku mi byly dány a zároveň jsem si stanovil požadavky:

1. Stávající uchycení nebylo vhodné z důvodu nepřírodního natočení a uchycení pro ideální záběr objektivu kamery vzorku. Požadavek: možnost regulace natočení.
2. V případě natočení určit přibližný úhel vůči vodorovné rovině. Požadavek: stupnice s vyznačenými úhly.

3. Kvůli původní konstrukci držáku nebylo možné termokameru nijak přiblížit zkoumanému vzorku. Požadavek: zahrnout do nového držáku možnost přisunutí termokamery.
4. Požadavek: snažit se zachovat něco z původní konstrukce pro ušetření nákladů na tisk.
5. Požadavek: při natočení držáku zachovat možnost snímání termokamery ve vodorovné rovině.
6. Požadavek: vylepšení uchycení termokamery v držáku (naneštěstí tuto podmínku se nepodařilo splnit).
7. Požadavek: možnost multifunkčního využití držáku.

### 3.3 Nové uchycení

Na základě těchto požadavků jsem přešel z modelu jednoduché součásti na sestavu jednotlivých součástí kombinující prvky zhotovené z kovu, konkrétněji normalizované i nenormalizované součásti, i vytisknuté komponenty na 3D tiskárně.

#### 3.3.1 Řešení požadavků

Požadavek číslo 1 jsem vyřešil pomocí otočné konstrukce držáku, která je schopna se otáčet kolem pevně uchycené osy v objímce na sloupu, která se kvůli tomu jen trochu upraví, a částečně je také uchycena ve stupnici. Osa je vyrobena z klasické oceli s osazením a závitem. Aretace držáku poté probíhá za pomoci šroubového spoje a třecí vazby v důsledku předpětí od utahení šroubu.

Požadavek číslo 2 jsem vyřešil zakomponováním držáku se stupnicí, který rovněž slouží k aretaci držáku. Model stupnice je vyroben metodou 3D tisku a samotná stupnice je členěna po 5 stupních, přičemž směrem dolů lze držák natočit o  $15^\circ$  a směrem nahoru o  $30^\circ$ . Tudíž rozsah stupnice a možného natočení je  $45^\circ$ .

Řešení požadavku 3 jsem provedl konstrukcí vysouvacího ramene, které kompatibilní s osovým uchycením. Z konstrukčního hlediska se může rameno vysunout o 74 mm. Zamezení samovolného posunu ramene bude uskutečněno opět pomocí třecí vazby od šroubového spoje.

Jak již bylo naznačeno u řešení požadavku 1, požadavek 4 je řešen tak, že objímka používána u původního držáku se jen částečně upraví pro přizpůsobení se nové konstrukci uchycení, čímž se zredukuje náklady na tisk.

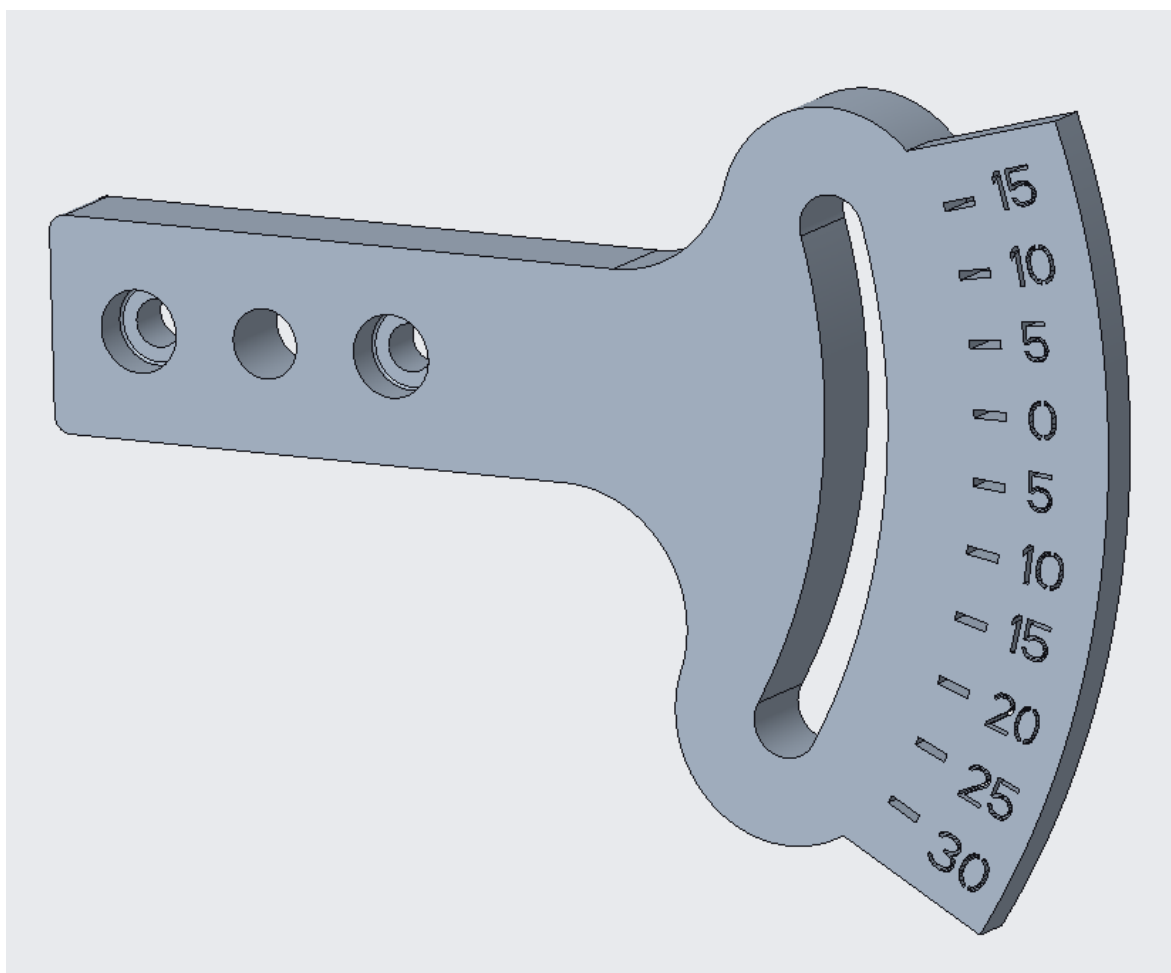
Kvůli požadavku číslo 5 je sestava vybavena samotnou součástí, držák termokamery, která je spojena s rámem pomocí šroubového spoje a statické vazby je dosaženo opět pomocí třecí síly, vzniklé v důsledku předpětí v šroubovém spoji.

Požadavek 6 na upravení uchycení termokamery k držáku nebylo možno splnit, jelikož nebyla možnost lépe přeměřit termokameru (viz. Závěrečné zhodnocení)

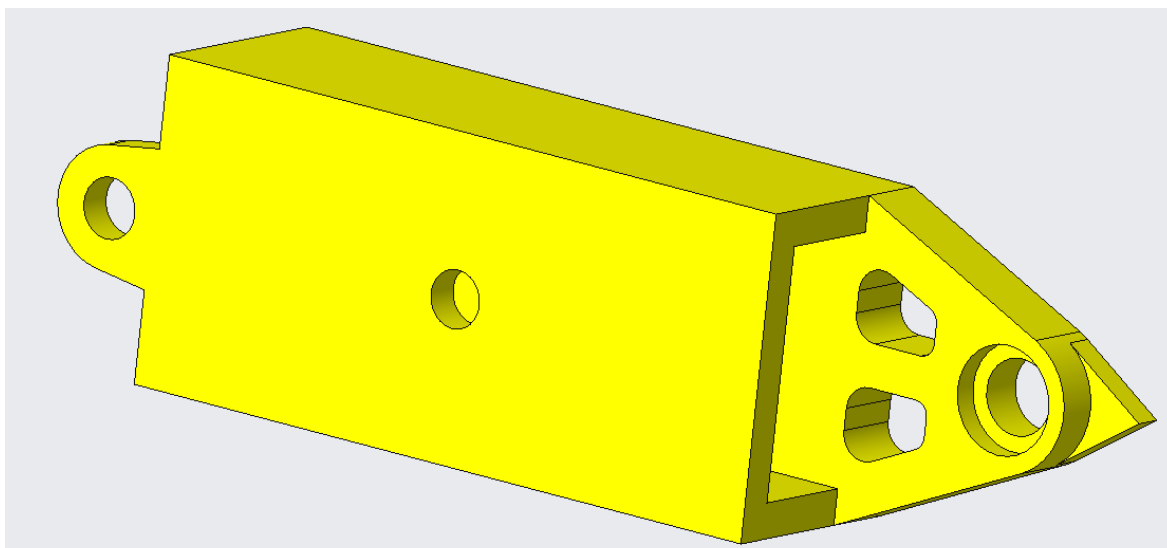
Požadavek číslo 7 je zahrnut i v řešení požadavku 5 a to šroubovým spojem. Tento spoj se dá jednoduše rozebrat a je možné vyměnit součást držák termokamery za jinou součást přizpůsobenou pro konkrétní zařízení podobné hmotnosti.

### 3.3.2 Popis konstrukce nového uchycení

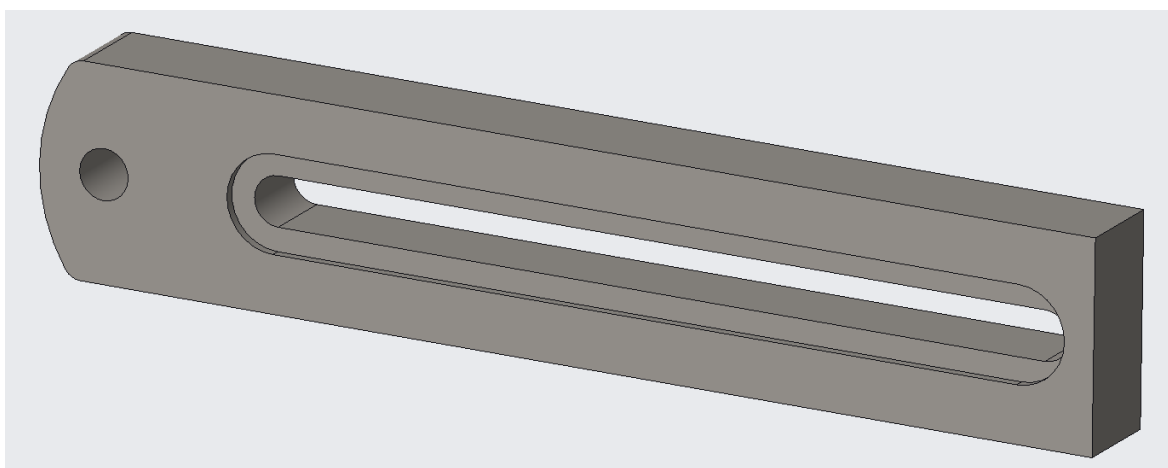
Jak již bylo zčásti naznačeno v kapitole 3.3.1, nové uchycení se skládá ze 4 větších součástí zhotovené metodou 3D tisku. Jmenovitě se jedná o držák se stupnicí, pouzdro, rameno a držák termokamery. Tyto součásti jsou znázorněny na Obr. 15, Obr. 17, Obr. 18 a Obr. 16 vytvořených softwaru Creo Parametric (barva modelů je z důvodu dobrého rozlišení jednotlivých součástí a neodpovídá barvě filamentu, ze kterého budou modely vytisknuty).



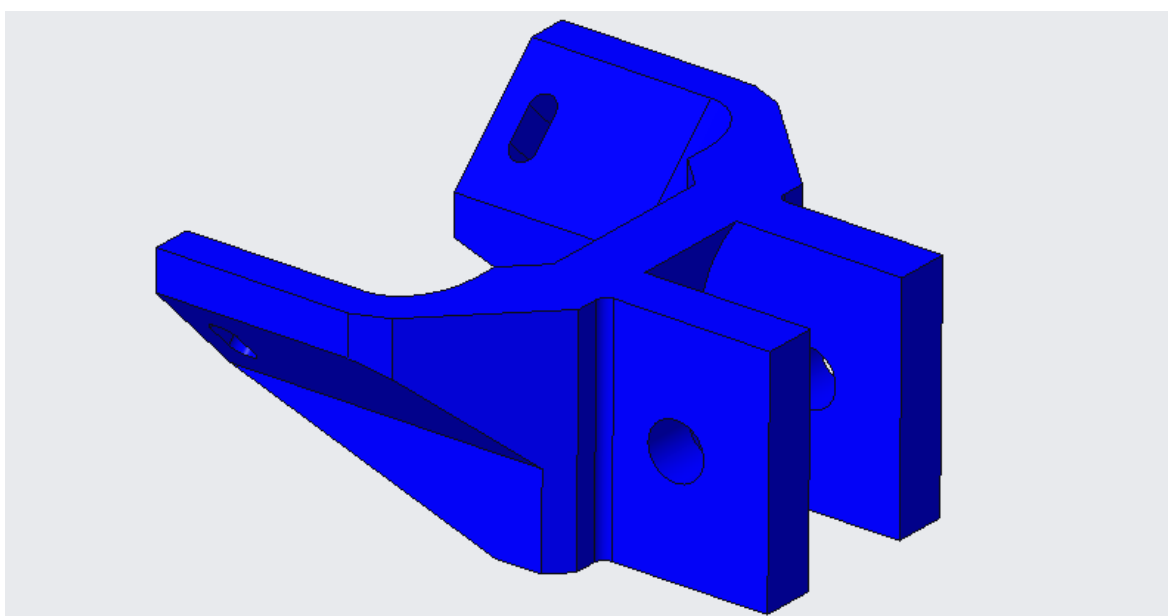
Obr. 15 CAD model držáku se stupnicí. Otvory se zahlužením jsou pro uchycení šrouby ISO 1207-M5x16, díra mezi nimi slouží pro průchod osy a otvor napravo slouží pro pohyb polohovacího šroubu při natočení uchycením.



Obr. 17 CAD model pouzdra, ve kterém se posouvá rameno. Díra nalevo slouží pro zamezení samovolného posuvu ramene, díra uprostřed je pro osu a díra napravo se zahloubením je pro speciální matici od polohovací šroubu. Zadní stěna je zesílena kvůli většímu namáhání.

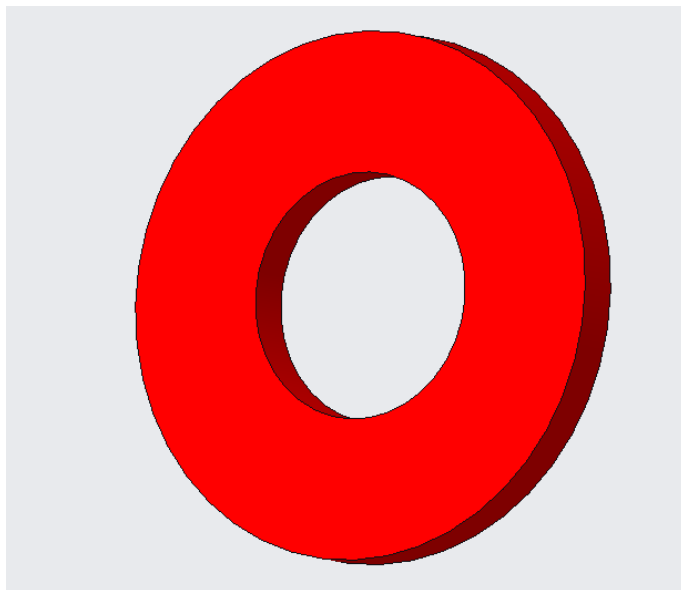


Obr. 18 CAD model vysouvacího ramene. Levá díra je pro šroubový spoj ramene s držákem termokamery. Otvor po délce slouží pro kompatibilitu s osou, který zamezuje přílišné vysunutí a zároveň snižuje namáhání pouzdra. Zahloubení je kvůli podložkám.



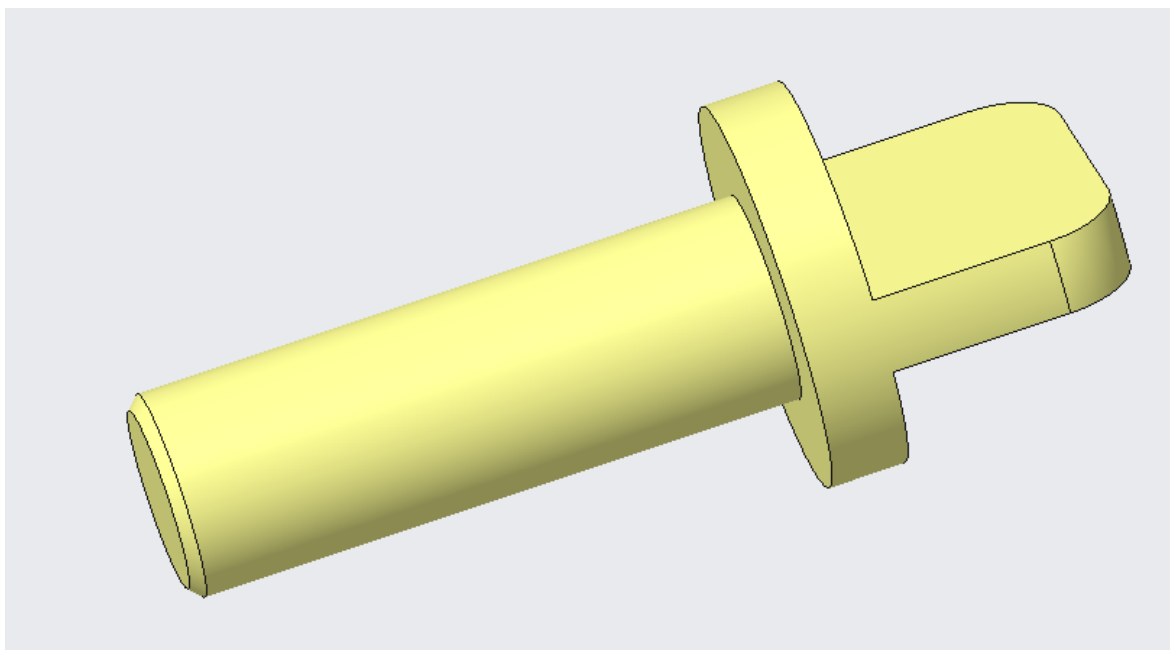
Obr. 16 CAD model držáku termokamery. Otvory napravo jsou pro spojení s ramenem. Zevnitř je nalepena guma zvětšující statický třecí koeficient. Ovalné otvory nalevo slouží pro šrouby při uložení termokamery do držáku.

Součástí sestavy jsou i podložky opět zhotovené metodou 3D tisku. Tyto podložky slouží zejména pro snížení otěru mezi jednotlivými komponenty. Na některých rovněž bude nalepena guma pro zvětšení koeficientu statického tření.



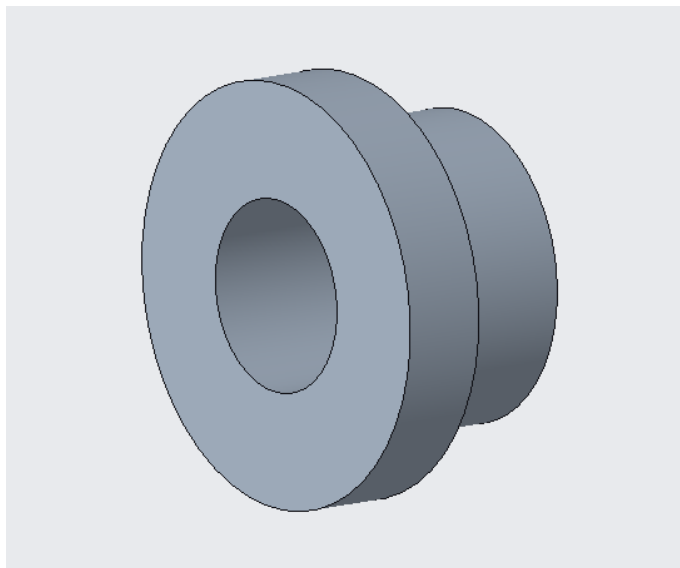
Obr. 19 CAD model podložky pro sestavu.

Zmíněné šrouby nejsou normalizované a jedná se o speciální šrouby s výstupkem na hlavě dovolující jednoduchou manipulaci a utažení. Mají však normalizovaný závit, který je v tomto případě M8. Šrouby mají rozšířenou hlavu pro lepší rozložení tlaku a snížení deformací vzniklých utažením. Šroub je vyroben z klasické uhlíkové oceli ČSN 12 060.



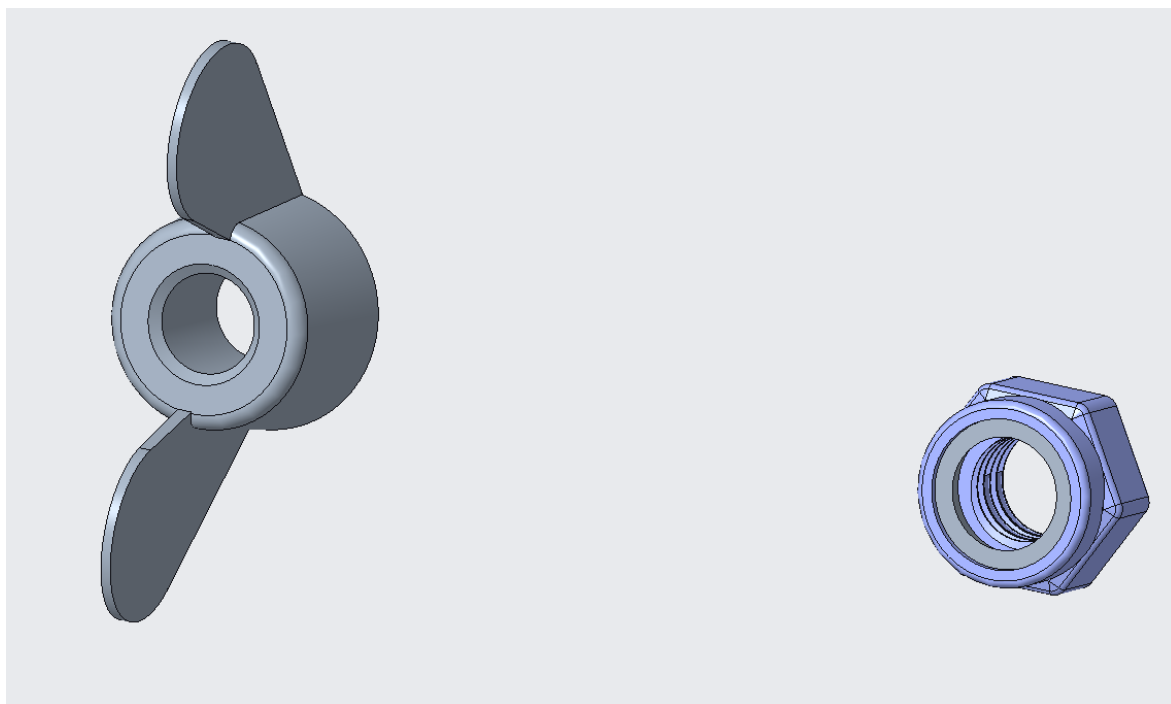
Obr. 20 CAD model speciálního šroubu, jenž je součástí sestavy. Závit není tímto softwarem vykreslen. Ostatní šrouby jsou podobné, mají jen rozdílnou délku.

Ocelová matice M8 v otvoru pouzdra je rovněž speciální, jelikož se jedná o nepohyblivou matici, kdy statické polohy je dosaženo pomocí lepeného spoje, aby nedocházelo k protáčení při utažení.



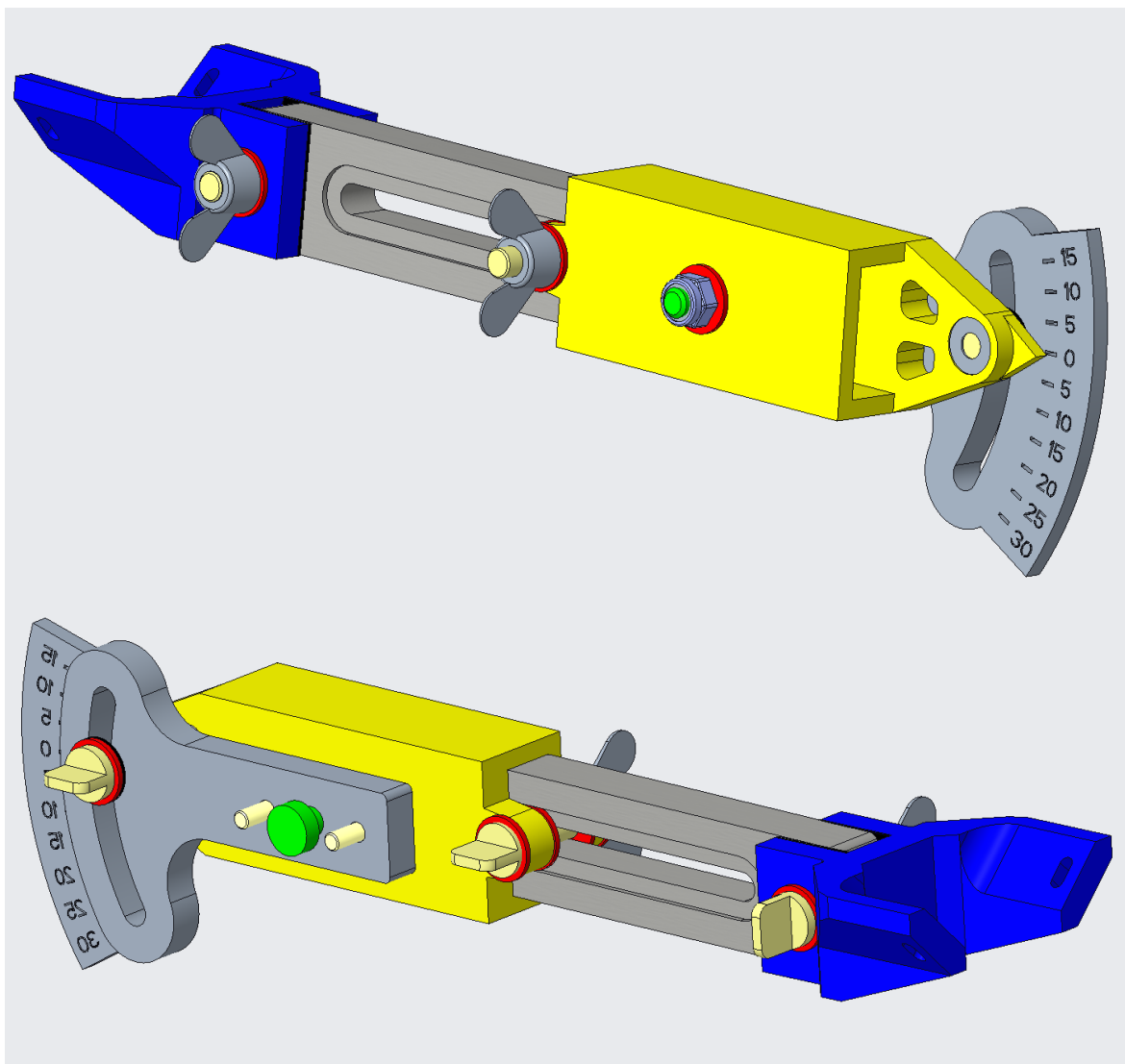
Obr. 21 CAD model speciální matice pro poudro.

Další díly použité v sestavě jsou křídlaté matice M8 ČSN 02 1665 a samojistná šestihranná matice M8 ISO 7040. Křídlaté matice volím z důvodu lepší manipulovatelnosti při utahování a samojistnou matici na osu, jelikož všechny součásti na ose jsou uloženy s vůlí kvůli možnosti tečného pohybu.



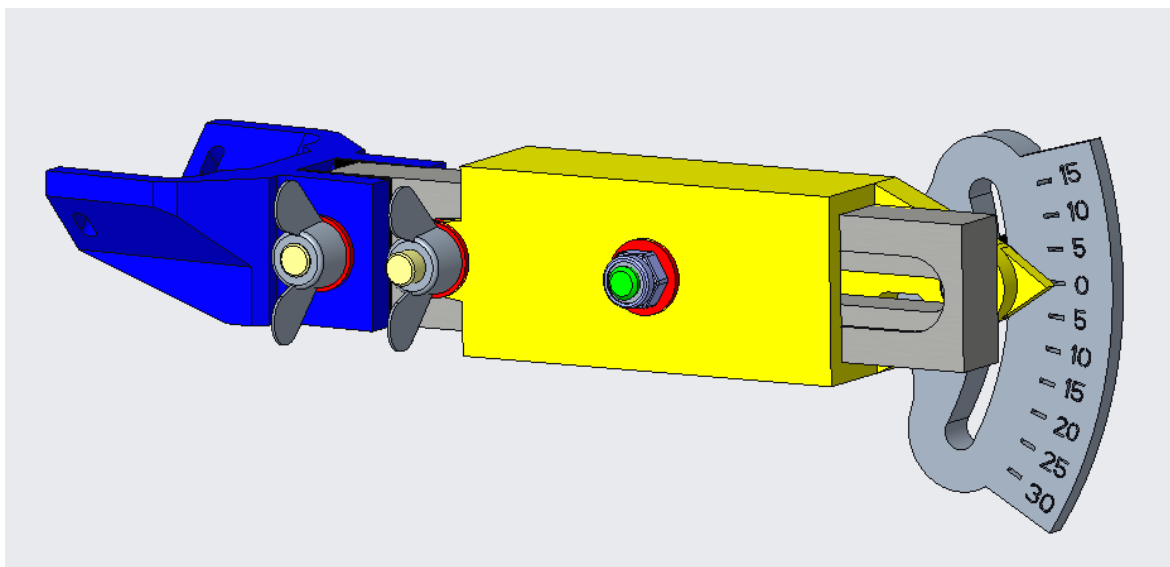
Obr. 22 CAD modely křídlaté matice a samojistné matice

Celá sestava poté vypadá následovně:



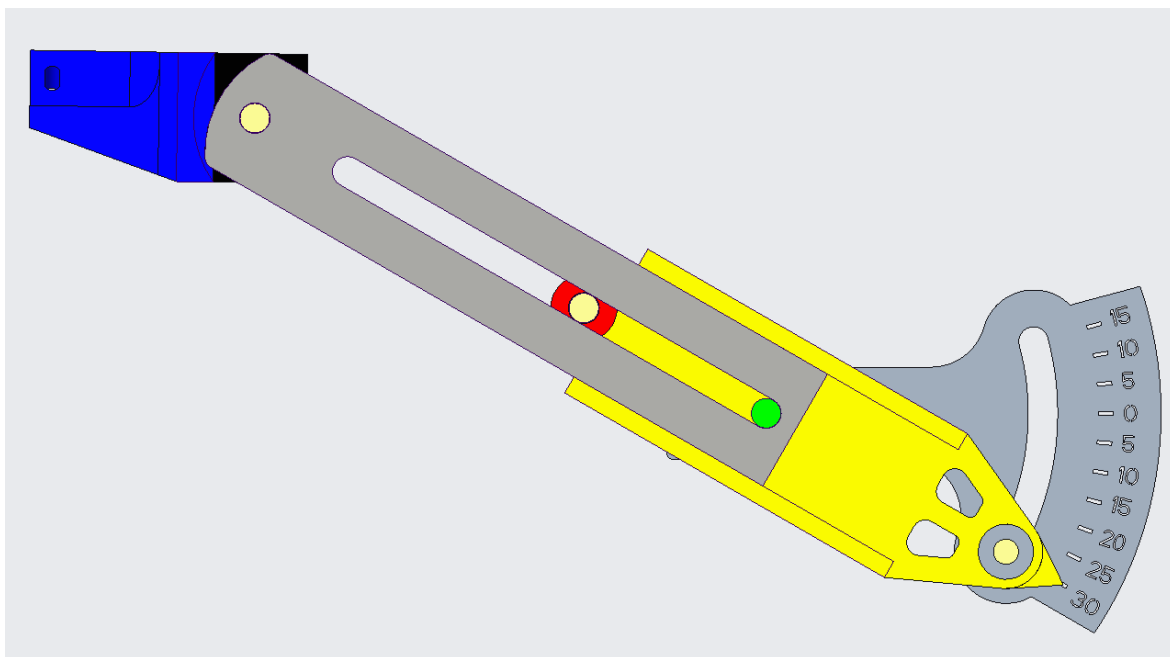
Obr. 23 CAD model celé sestavy plně vysunutě (2 protilehlé pohledy)

Po zasunutí ramene do pouzdra:



Obr. 24 CAD model sestavy při zasunutí ramene

Jak již bylo zmíněno, s konstrukcí lze natáčet pro přizpůsobení se měřícím potřebám a držák termokamery lze natočit do vodorovné polohy pro kolmý pohled na měřený vzorek.



Obr. 25 CAD model v řezu při plném vysunutí a zároveň natočení o 30°, přičemž držák je ve vodorovné poloze.

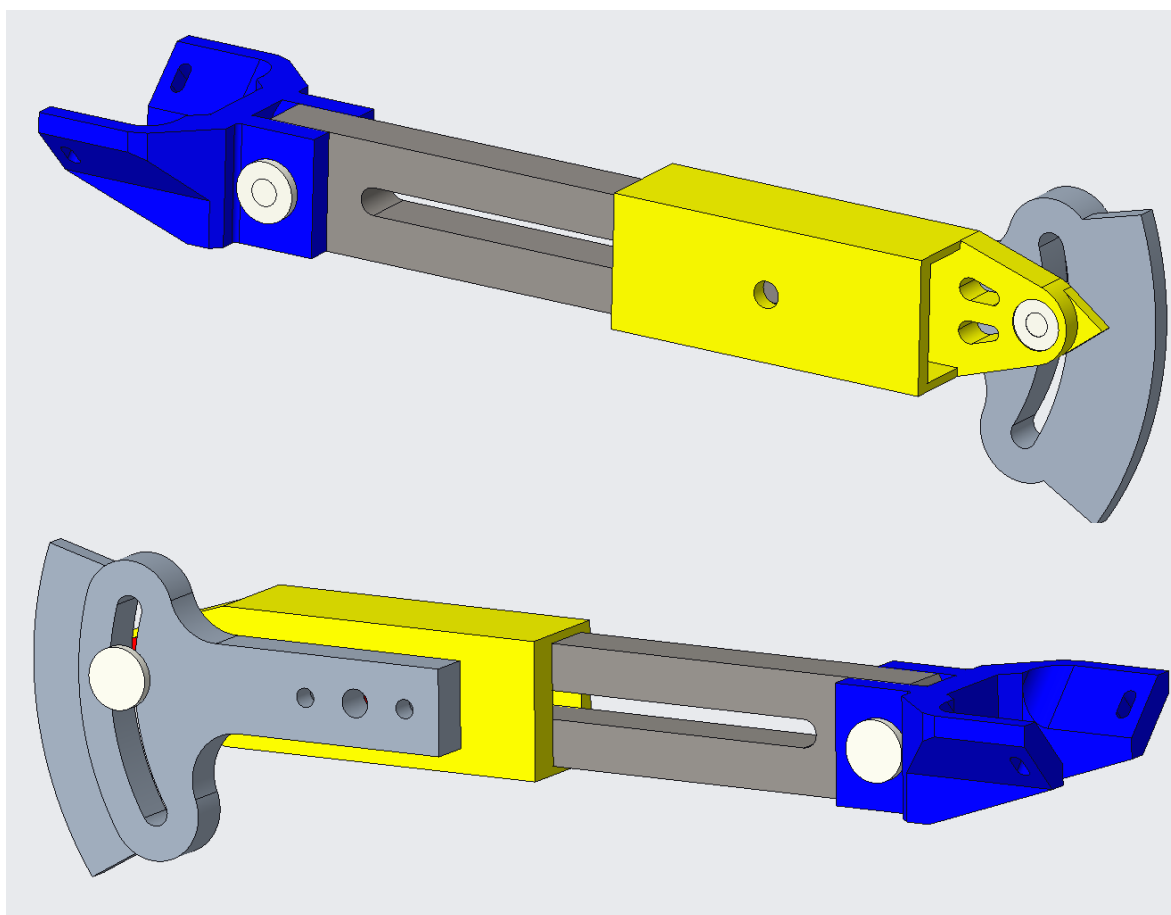


## 4 Simulace MKP

Analýza metodou konečných prvků byla provedena v softwaru ANSYS Workbench 2019R1. Pro výpočet byl model sestavy upraven, což bude rozebráno v samostatné kapitole. Bylo provedeno několik výpočtů, a to hlavně kvůli zpřesnění výsledků a pro provedení citlivostní analýzy. Zároveň byl model počítán jen pro jeden zátěžový stav, při kterém dochází největšímu namáhání všech součástí vlivem maximálního ohybového momentu.

### 4.1 Úprava výpočtového modelu

Kvůli lepšímu a kvalitnějšímu síťování bylo nutné model sestavy upravit, přičemž jsem odstranil nežádoucí irelevantní prvky jako zaoblení a zkosení (relevantní zkosení a zaoblení jsem neodstraňoval).



Obr. 26 Upravený výpočtový model

Pro výpočet byly odstraněny prvky číslic na stupnici, dále bylo odstraněno zahlbouní pro podložky na vysouvacím ramenu, výstupky s dírou pro šroub na pouzdře. Odstraněna byla také osa, kterou nahradila vazba, podložky byly rovněž odstraněny, nicméně hlavy šroubů měli stejný průměr jako podložky. Šrouby jsem vymodeloval zjednodušené. Všechny tělesa jsou uložena bez vůle na těsno.

## 4.2 Materiál těles

Pro matice a šrouby jsem použil materiál ocel z knihovny materiálu v softwaru ANSYS s předem definovanými parametry:

Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 12 060

Ocel	Hodnota	Jednotka
Modul pružnosti $E_s$	200 000	MPa
Poissonovo číslo $\mu_s$	0,3	-
Mez kluzu $R_{es}$ [16]	345	MPa
Hustota $\rho_s$	7 850	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Materiál, z něhož jsou vyhotoveny plastové části metodou 3D tisku, se jmenuje onyx. Pro výpočet uvažuji izotropní chování tohoto materiálu. Vzhledem k tisku a velkému rozsahu proměnných vstupujících do této operace, není možné uvažovat mechanické vlastnosti samotného filamentu, ze kterého se modely tisknou. Na základě tohoto faktu byly provedeny destruktivní zkoušky pro zjištění příčinných vlastností materiálu onyx (ty nejsou předmětem této práce, nýbrž jiné dosud nepublikované, tudíž použiji jen výsledky):

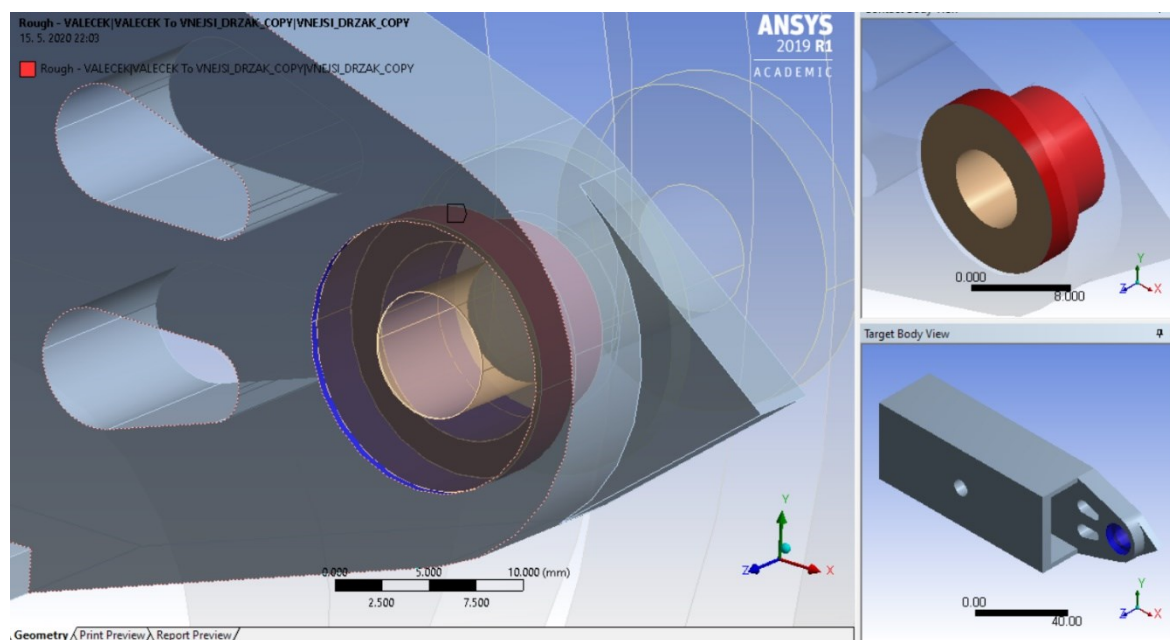
Tab. 9 Mechanické vlastnosti materiálu onyx

Onyx	Hodnota	Jednotka
Modul pružnosti $E_o$	950	MPa
Poissonovo číslo $\mu_o$	0,43	-
Mez kluzu $R_{eo}$	11,5	MPa
Hustota $\rho_o$	1 200	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

## 4.3 Kontakty

Z důvodu výpočtu sestavy bylo nutné mezi jednotlivými tělesy vytvořit kontakty vyjadřující různé typy vzájemné interakce. Pro většinu těles byly použity kontakty bez tření jmenovitě *frictionless*. Nicméně pro co nejpřesnější stanovení skutečných podmínek jsem mezi určitá tělesa umístil třecí kontakt jmenovitě *frictional* s hodnotou koeficientu statického tření  $f_s = 0,4$ . V tomto případě se jedná o odhad této hodnoty, jelikož nebylo možné experimentálně stanovit přímo třecí koeficient. Z toho důvodu jsem použil v sestavě i gumové podložky, které vlivem adhezivních sil mohou koeficient navýšit z původně odhadovaných 0,2 na výše zmíněných 0,4.

Pro matici umístěnou v pouzdru uvažují vzhledem k přilepení lepidlem hrubý kontakt jmenovitě *rough*, který zabraňuje možnému protáčení v důsledku nekonečně velkého koeficientu tření a zároveň je možné oddělení okrajů otvorů pouzdra od matice, jelikož lepidla mají lepší vlastnosti ve smyku než tahu. [12]

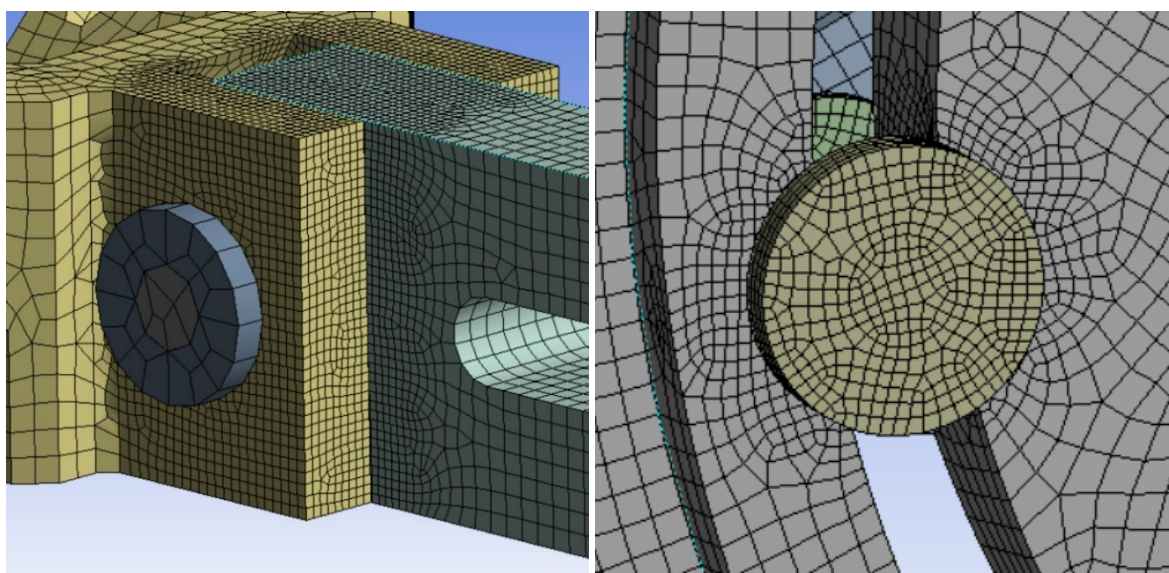


Obr. 27 Znáornění hrubého kontaktu mezi maticí a pouzdrem.

#### 4.4 Síť

Z hlediska výpočtů jsem použil několik velikostí sítí pro vytvoření citlivostní analýzy z vypočítaných výsledků. Vzhledem k nelineárním kontaktům, mezi které patří třecí kontakt a hrubý kontakt, jsem použil typ sítě nelineární, z důvodu lepších tvarů elementů a lepšího rozložení elementů. Tvar elementu jsem zvolil hexaedr s částečným výskytem tetraedrů, pro stanovení kvalitnějších výsledných hodnot, přičemž jsem uvažoval lineární topologii, tedy elementy bez meziuzlů. [13]

Pro místa s třecími kontakty jsem provedl úpravu sítě ve smyslu zmenšení elementů a lepšího rozložení sítě.



Obr. 28 Zmenšení elementů v místech třecích kontaktů

Pro kovové součásti jsem použil větší velikost elementů než pro součásti z onyxu, jelikož namáhání těchto součástí generuje zanedbatelné napětí vzhledem k mezi kluzu daného materiálu na rozdíl od součástí z onyxu. Zároveň jsem volil menší velikost elementů pro více namáhané součásti, konkrétně rameno či držák se stupnicí.

Pro výpočet jsem použil 4 typy síťování: velmi hrubé, hrubé, jemné a velmi jemné.

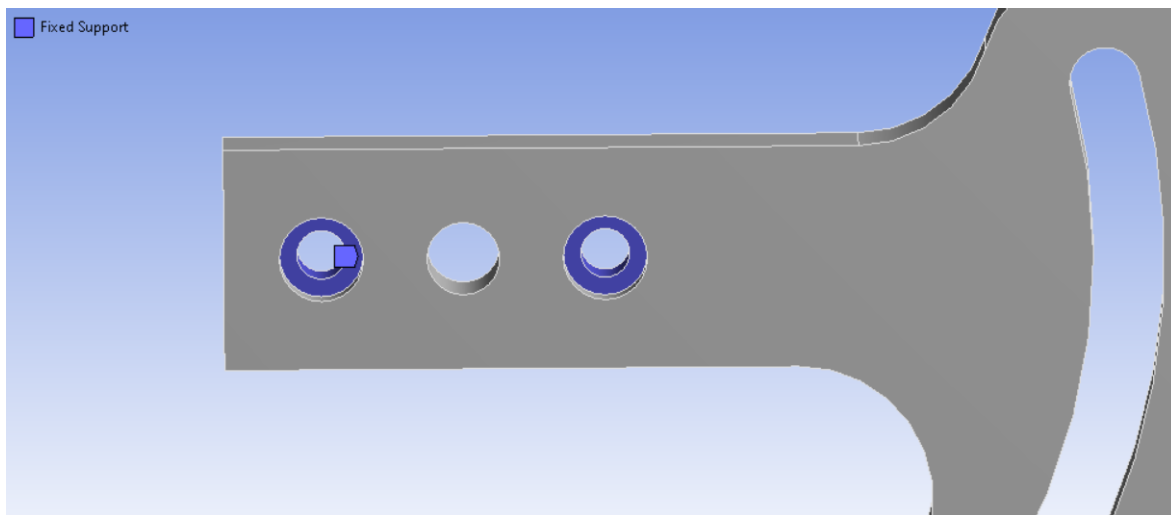
Typ sítě	Dominantní velikost elementů [mm]	Velikost elementů v třecích kontaktech [mm]	Počet uzlů
velmi hrubá	5	1	40 120
hrubá	3	0.85	75 122
jemná	2	0,8	105 167
velmi jemná	1,25	0.4	443 261

## 4.5 Okrajové podmínky

Pro tento model jsem obecně uvažoval zatížení silou od termokamery, vlastní tíhu, předpětí ve šroubech z utažení a vazby.

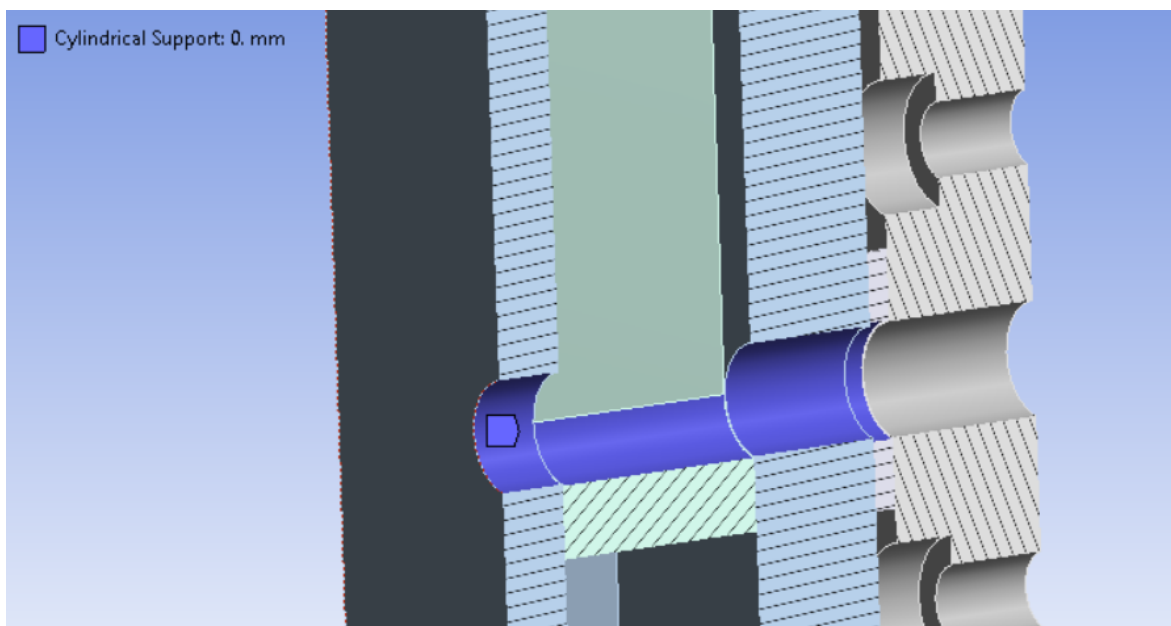
### 4.5.1 Vazby

Na sestavu jsem aplikoval celkem 2 vazby, vetknutí, kterým jsem nahradil přišroubování držáku se stupnicí k objímce, a cylindrickou vazbu, která nahradila osu, kolem které je sestava se schopna otáčet.



Obr. 29 Zobrazení místa vetknutí nahrazující přišroubování k objímce

Cylindrickou vazbu jsem aplikoval na všechny součásti, které jsou v kontaktu s osou (kromě stupnice, která má vzhledem k okolnímu vetknutí minimální vliv na cylindrickou vazbu).



Obr. 30 Cylindrická vazba v řezu aplikovaná na zaoblené zakončení otvoru vysouvacího ramene, díry v pouzdru a podložku

#### 4.5.2 Síly

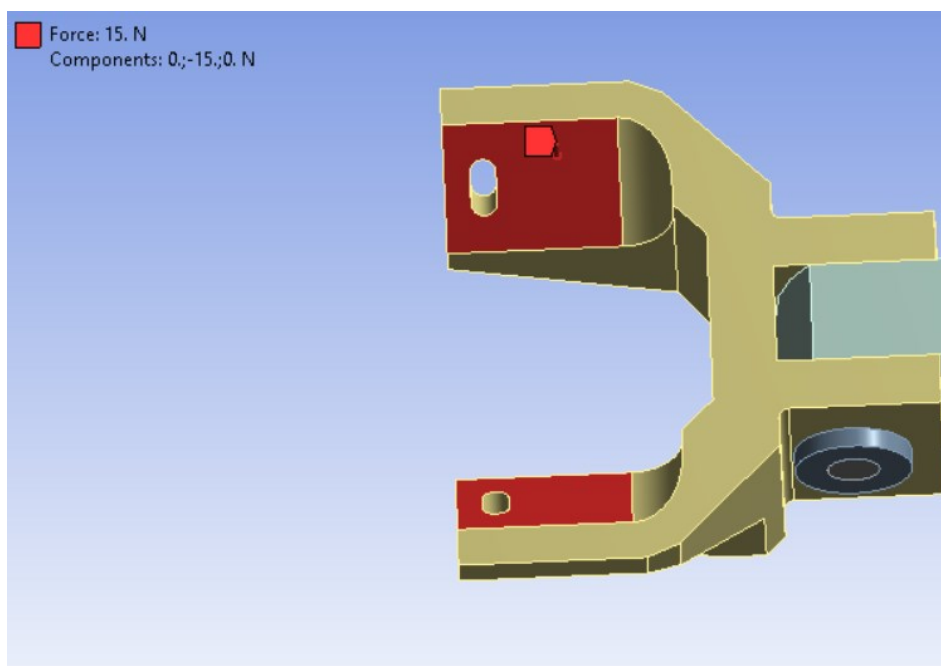
Pro celou sestavu jsem použil zatížení od vlastní tíhy pro realističtější předpoklady, kde jsem uvažoval tíhové zrychlení nabízené softwarem  $-9\,806,6\text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Sílu generovanou termokamerou umístěnou v držáku jsem stanovil:

$$F_{Gter} = m_{ter} \cdot g = 1,04 \cdot 9,81 = 10,2\text{ N} \quad (4.1)$$

kde  $m_{ter}$  je hmotnost termokamery včetně baterie deklarovaná výrobcem

Nicméně vzhledem k možnému přidání dalších komponent termokamery jako může být objektiv či vlastní tíha použitých kabelů a konektorů, zvolil jsem působící sílu  $F_G = 15 \text{ N}$ , čímž jsem se dostal více na stranu bezpečnosti i co se týče provedení 3D tisku.



Obr. 31 Ukázka umístění aplikace síly od termokamery

Dále jsem ještě uvažoval předpětí ve šroubech vlivem utažení pro správnou funkci třecích kontaktů. Sílu předpětí pro oba šrouby jsem stanovil z momentové rovnováhy.

Pro šroub spojující držák termokamery s ramenem je momentová rovnováha:

$$M_{G1} \leq M_{t1} \quad (4.2)$$

kde  $M_{G1}$  je moment vyvozený působící silou  $F_G$  a  $M_{t1}$  je moment působící třecí silou vzniklou v důsledku předpětí.

$$F_G \cdot r_{G1} \leq F_{t1} \cdot r_{t1} \quad (4.3)$$

kde  $F_G$  je působící síla,  $r_{G1}$  je vzdálenost krajního bodu držáku termokamery, na nějž působí síla, od osy šroubu,  $F_{t1}$  je třecí síla vzniklá vlivem předpětí,  $r_{t1}$  je vzdálenost působíště třecí síly od osy šroubu (střed mezi okrajem díry pro šroub a povrchem držáku).

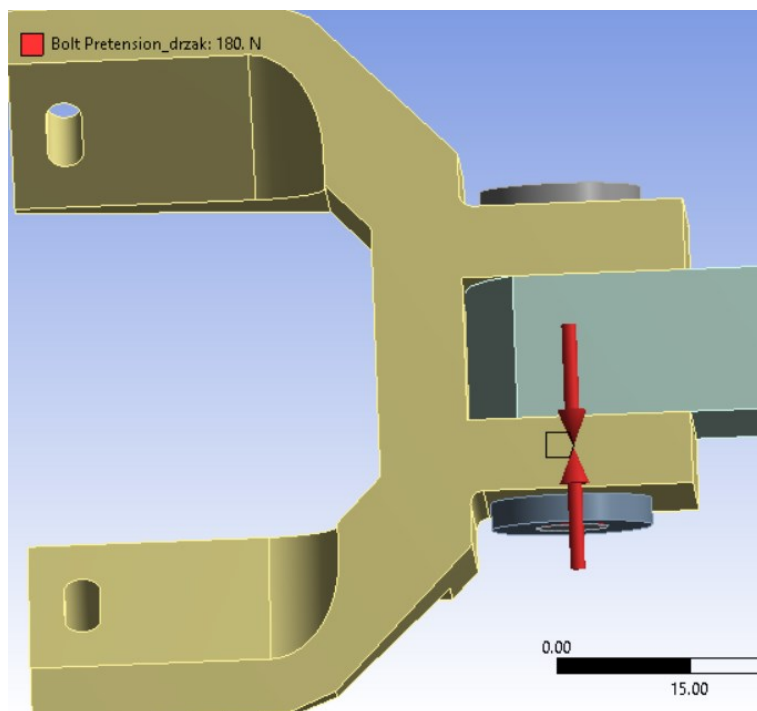
Po dosazení a vyjádření  $F_{t1}$ :

$$F_{t1} \geq \frac{F_G \cdot r_{G1}}{r_{t1}} = \frac{15 \cdot 55}{12,5} = 66 \text{ N} \quad (4.4)$$

Následně síla předpětí ve šroubu:

$$F_{01} \geq \frac{F_{t1}}{f_s} = \frac{66}{0,4} = 165 \text{ N} \quad (4.5)$$

Na základě tohoto výpočtu volím hodnotu předpětí ve šroubu držáku termokamery  $F_{01} = 180 \text{ N}$ .



Obr. 32 Předpětí ve šroubu držáku termokamery

Analogicky postupuji i pro šroub modelu se stupnicí:

$$M_{G2} \leq M_{t2} \quad (4.6)$$

kde  $M_{G2}$  je moment vyvozený působící silou  $F_G$  a  $M_{t2}$  je moment působící třecí silou vzniklou v důsledku předpětí.

$$F_G \cdot r_{G2} \leq F_{t2} \cdot r_{t2} \quad (4.7)$$

kde  $F_G$  je působící síla,  $r_{G2}$  je vzdálenost krajního bodu držáku termokamery, na nějž působí síla, od osy natáčení sestavy,  $F_{t2}$  je třecí síla vzniklá vlivem předpětí,  $r_{t2}$  je vzdálenost osy natáčení sestavy od osy šroubu spojující držák se stupnicí a pouzdro.

Po dosazení a vyjádření  $F_{t2}$ :

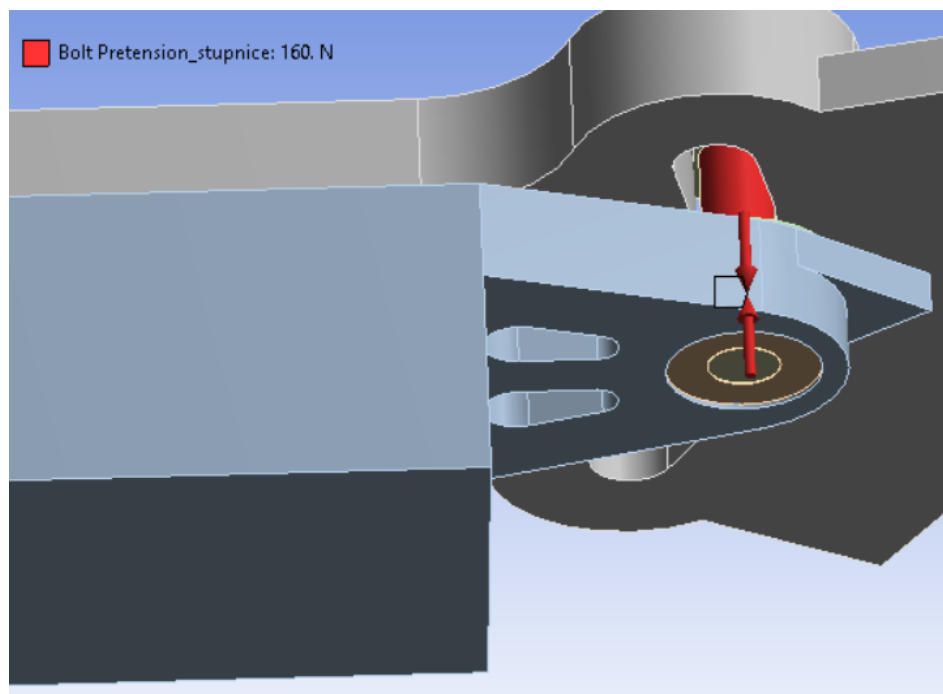
$$F_{t2} \geq \frac{F_G \cdot r_{G2}}{r_{t2}} = \frac{15 \cdot 235}{75} = 49 \text{ N} \quad (4.8)$$

Následně síla předpětí ve šroubu:

$$F_{02} \geq \frac{F_{t2}}{f_s} = \frac{47}{0,4} = 122,5 \text{ N} \quad (4.9)$$

Na základě tohoto výpočtu volím hodnotu předpětí ve šroubu od držáku se stupnicí  $F_{02} = 160 \text{ N}$ .





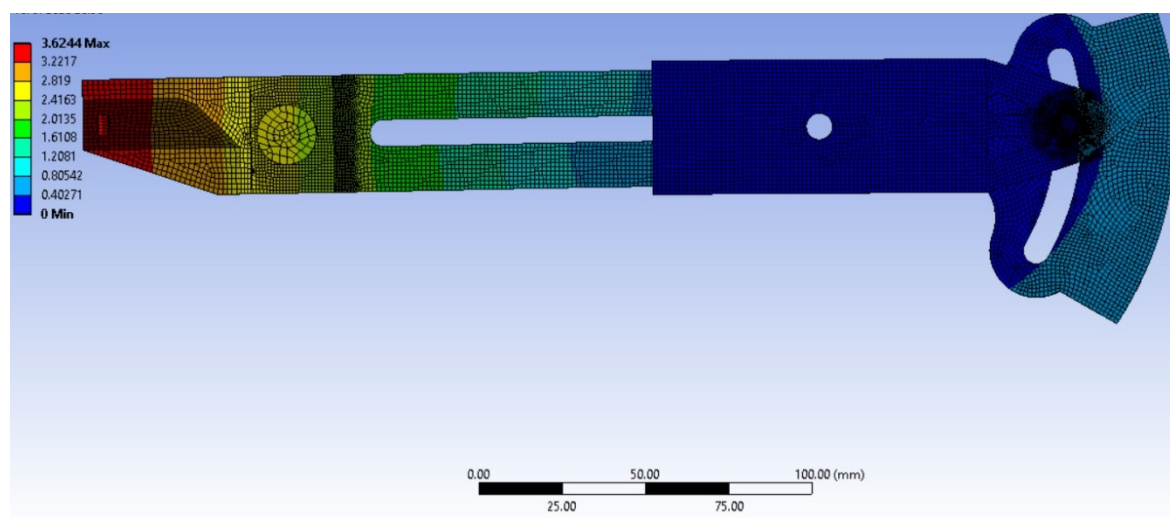
Obr. 33 Předpětí ve šroubu od držáku se stupnicí

## 4.6 Výsledky

Celý výpočetní model byl řešen pomocí řešiče Mechanical APDL, který je základním řešičem v softwaru ANSYS Workbench.

### 4.6.1 Posunutí

Po výpočtu celé sestavy jsem získal následující výsledek, co se týče posunutí vlivem deformace:

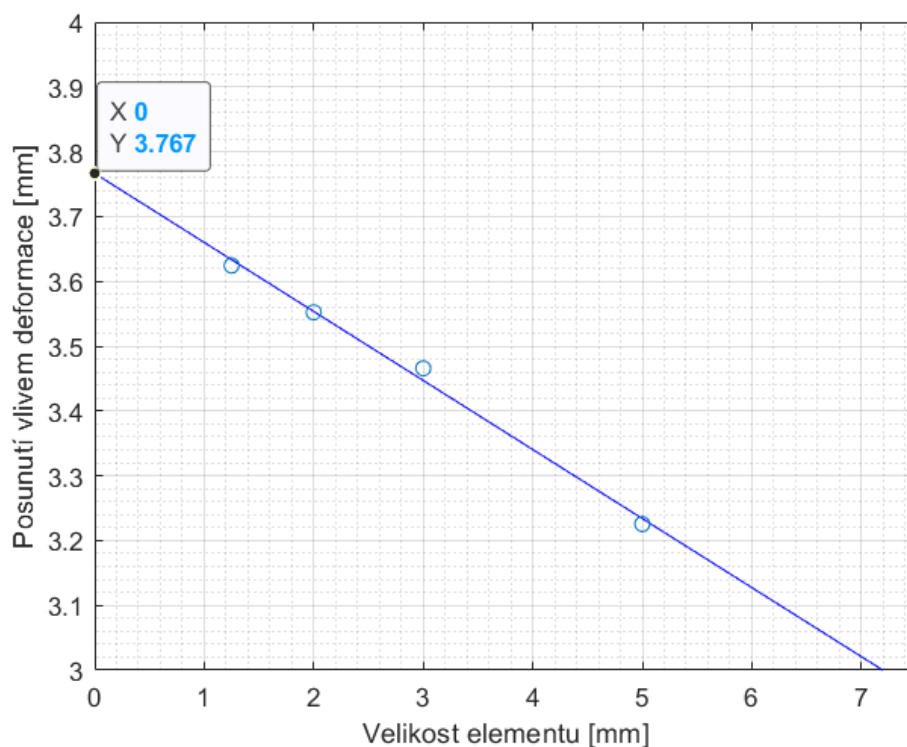


Obr. 34 Deformace a hodnota posunutí vlivem zatížení sestavy pro velmi jemnou síť

Deformace odpovídá předpokladům a celkové posunutí činí 3,62 mm, což lze akceptovat vzhledem k tomu, že jde provést korekci záběru termokamery buďto natočením držáku, nebo natočením celé sestavy.



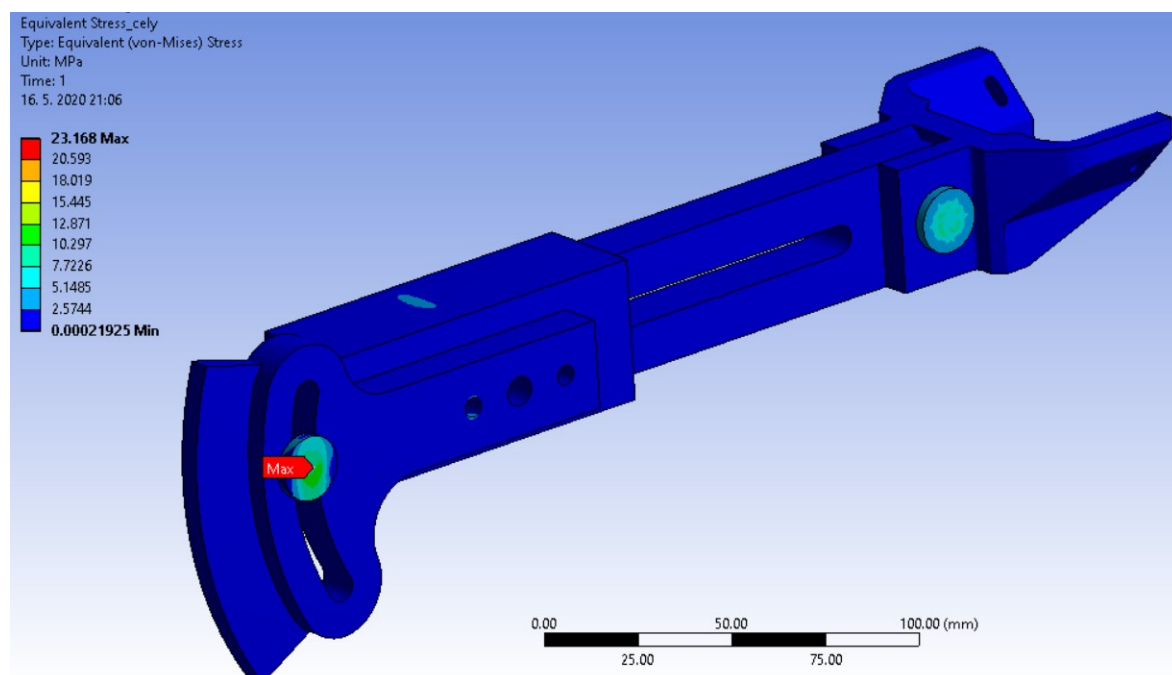
Na základě získaných dat z různých typů sítí jsem schopen pomocí lineární aproximace vytvořit výsledné posunutí pro velikost elementu blíží se nekonečnu, které činí přibližně 3,8 mm.



Graf 1 Lineární aproximace závislosti celkového posunutí na velikosti elementu. Modré kroužky značí posunutí pro konkrétní síť.

#### 4.6.2 Napětí

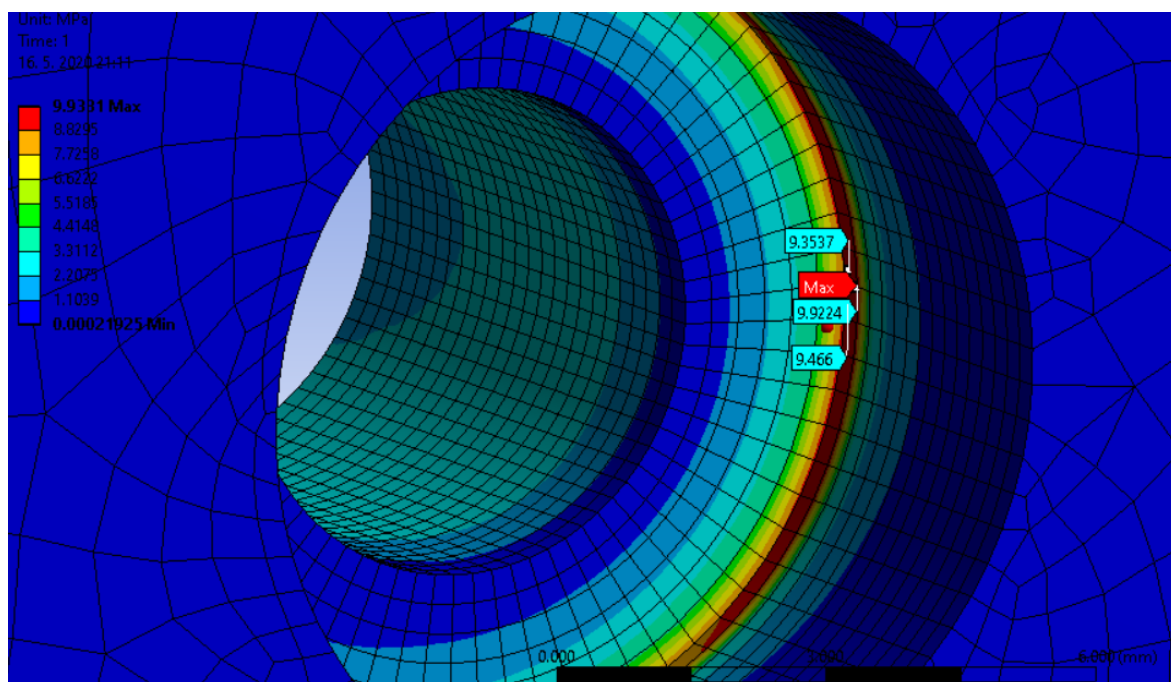
Na všech následujících obrázcích je vykresleno redukované napětí podle HMM, pro celou sestavu to je:



Obr. 35 Rozložení redukovaného napětí v celém modelu.

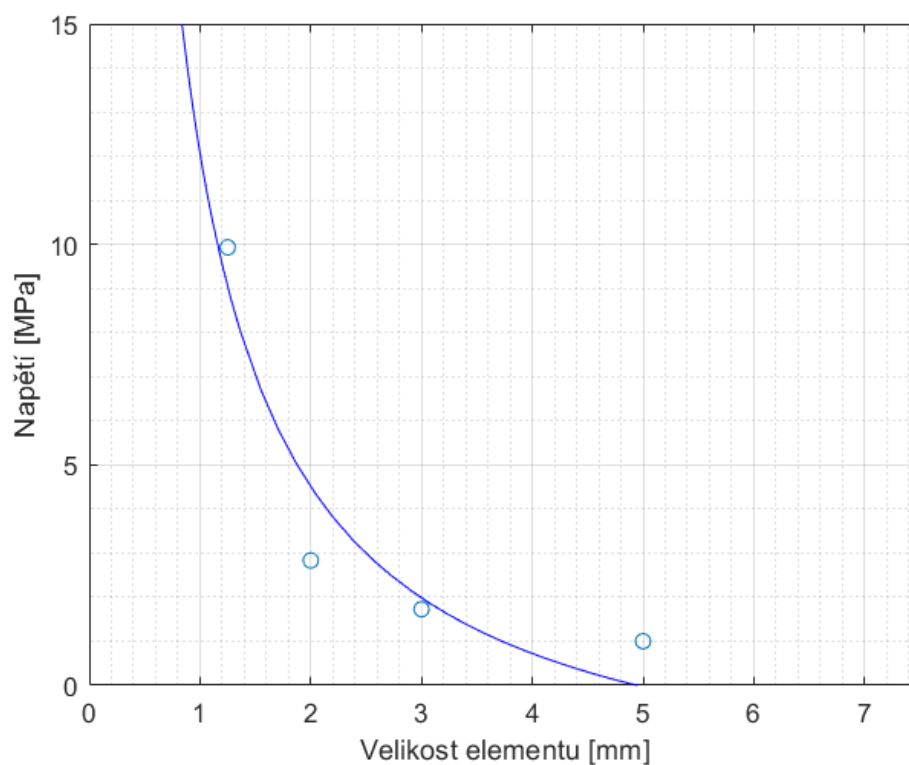
Z Obr. 35 lze vypočítat, že největší napětí se nachází v ocelových součástech a zkrusují tak hodnoty v plastových částech. Z toho důvodu řeším plastové části jednotlivě.

#### 4.6.2.1 Držák se stupnicí



Obr. 36 Napětí v díře se zahloubením pro šroub v místě ostrého přechodu. Zobrazené hodnoty mají jednotku MPa.

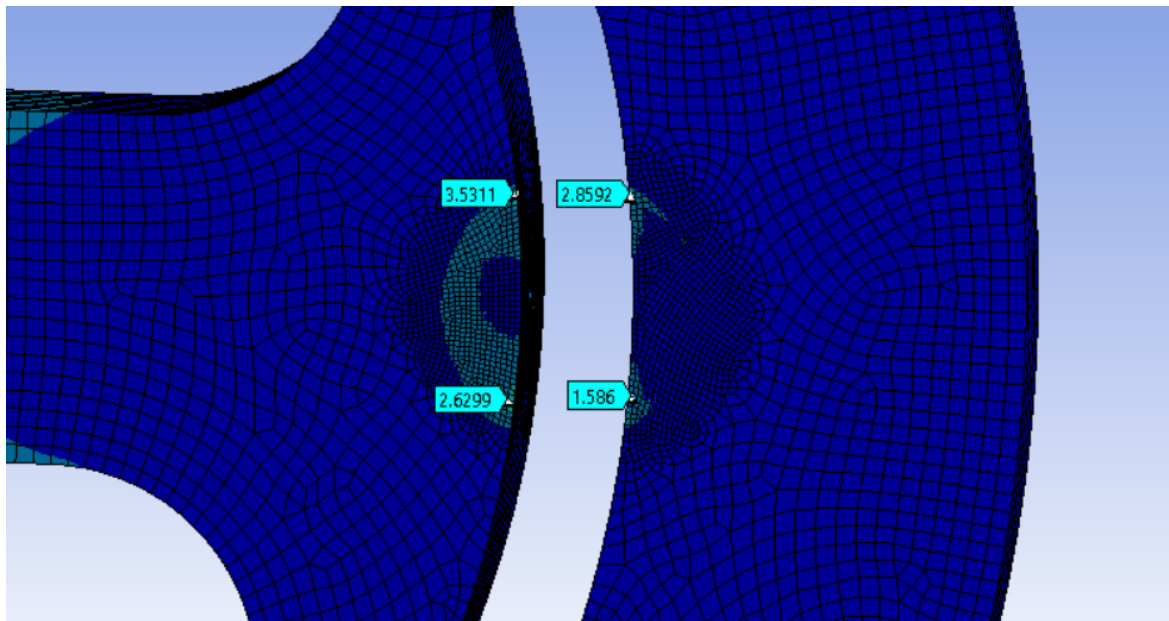
Největší napětí pro velmi jemnou síť se nachází v místě ostrého přechodu v díře šroubu, které činí 9,93 MPa. Nicméně tato vysoká hodnota je způsobena právě ostrým přechodem,



Graf 2 Graf aproximace napětí v místě přechodu pro funkci  $x^{-1}$ . Modré kroužky značí hodnotu napětí pro konkrétní síť.

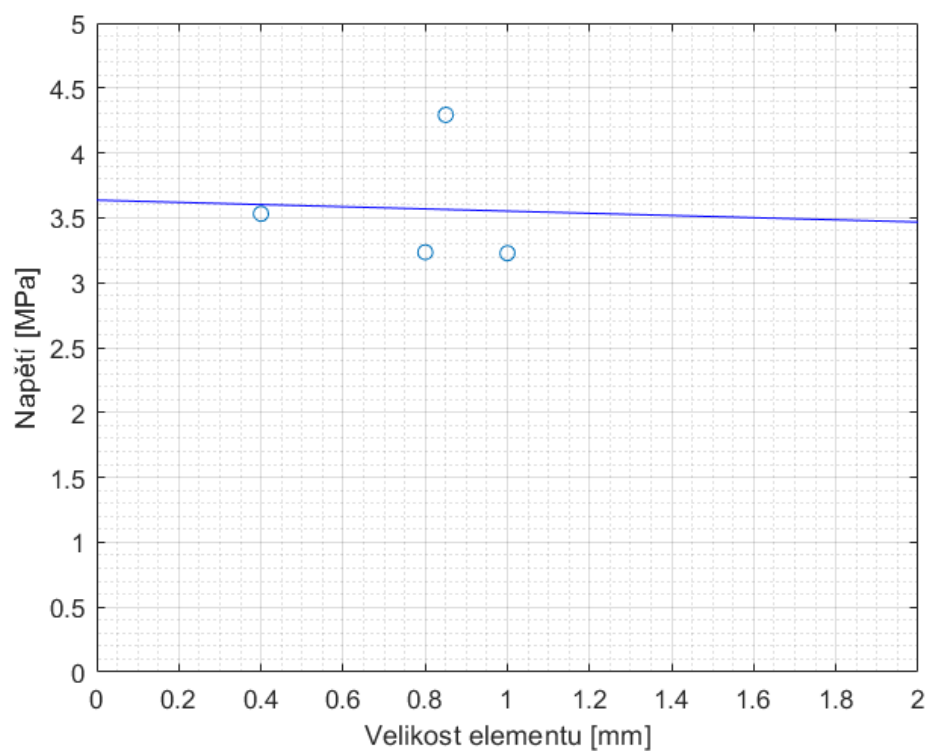
který způsobuje singularitu (viz Graf 2). Tento přechod ve skutečném modelu nebude, jelikož je na tomto místě navrženo zaoblení, které sníží napětí.

V případě místa umístění předepjatého šroubu dochází ke generaci těchto hodnot napětí:



Obr. 37 Napětí v místě předepjatého šroubu.

Opět mohu vytvořit graf lineární aproximace díky změnám sítě, přičemž tentokrát počítám s velikostí elementu v místě kontaktu:

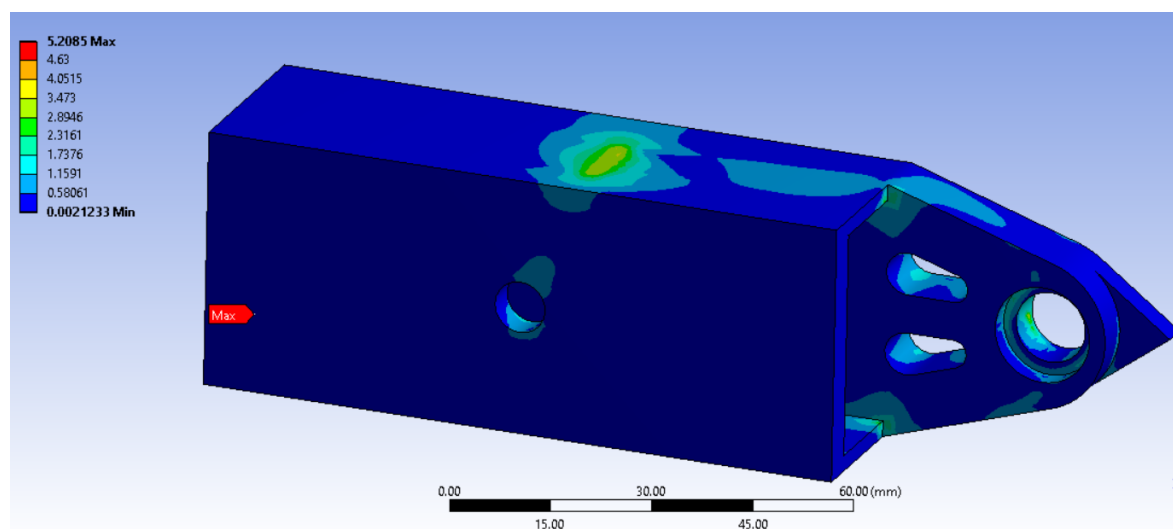


Graf 3 Lineární aproximace napětí v místě předepjatého šroubu. Modré kroužky značí hodnotu napětí pro konkrétní síť.

Skutečné napětí by na základě této aproximace mělo být přibližně 3,6 MPa.

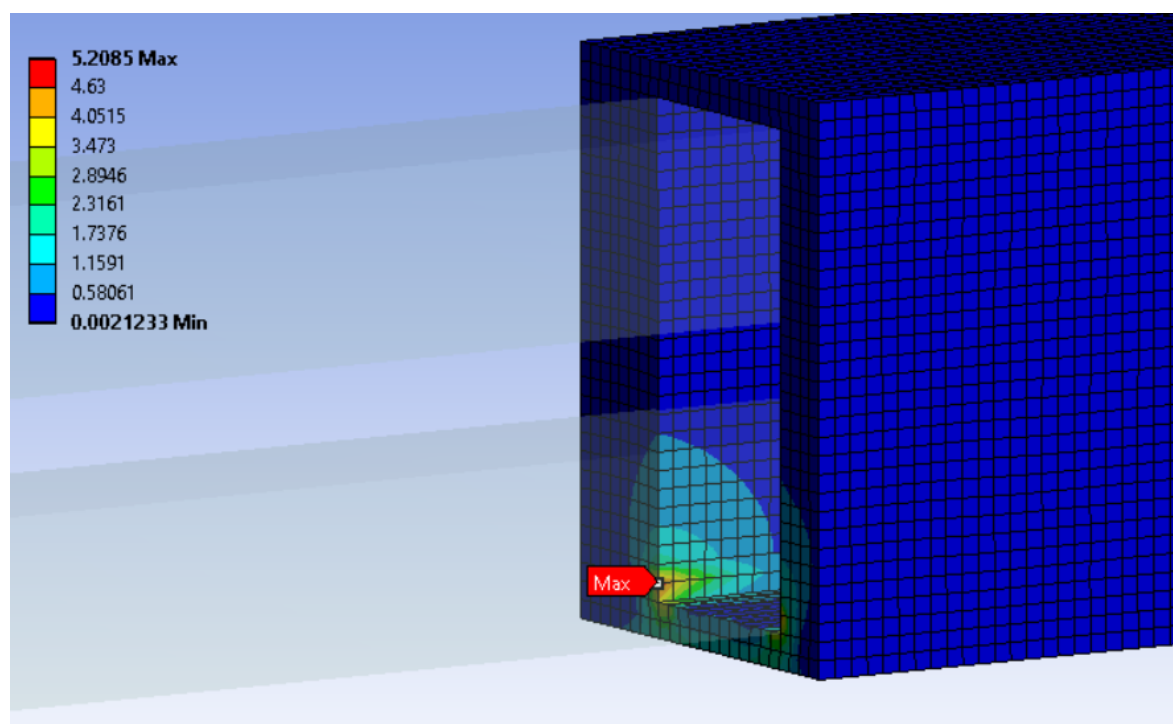
#### 4.6.2.2 Pouzdro

Pro pouzdro vyšlo v případě velmi jemné sítě toto rozložení napětí:



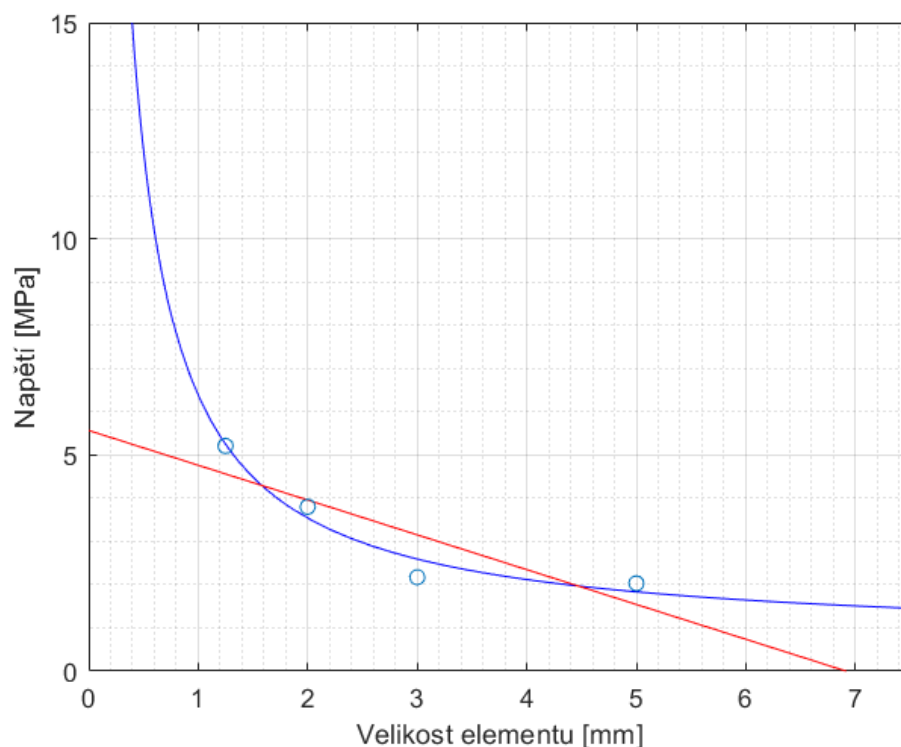
Obr. 38 Rozložení napětí na tělese pouzdra

Místo styku s vysouvacím ramenem je místo s maximálním napětím, jehož hodnota činí přibližně 5,21 MPa.



Obr. 39 Místo s maximálním napětím pro pouzdro

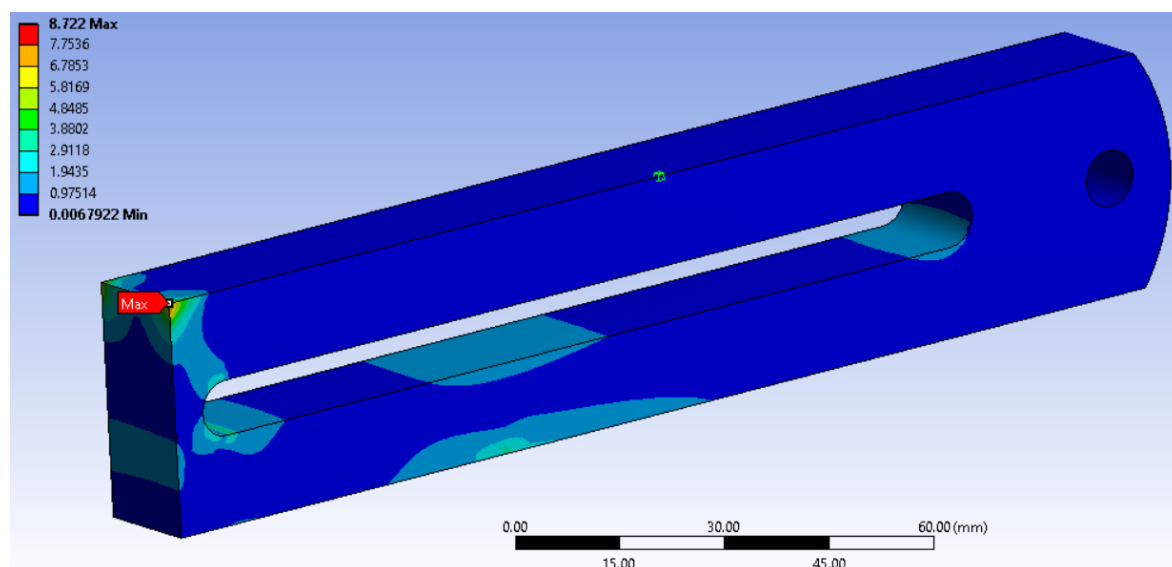
Opět na základě aproximace lze vytvořit graf s možným vývojem napětí v tomto místě. Vzhledem k rychlému nárůstu napětí v závislosti na síti je možné, že se jedná o singularitu, která vznikla v důsledku stejného rozměru ramene jako otvoru pouzdra, což ve skutečnosti nebude možné vzhledem k výrobním vřlím. Respektive nedojde k singularitě jako v Graf 2 (modře) a předpokládám lineární průběh (červeně).



Graf 4 Aproximace napětí v místě dotyku ramene s pouzdem pro pouzdro. Modrá křivka značí aproximaci pomocí funkce  $x^{-1}$  a červená čára značí lineární aproximaci. Modré kroužky značí hodnotu napětí pro konkrétní síť.

Napětí by v tomto místě mělo ve skutečnosti dosahovat přibližně 5,5 MPa.

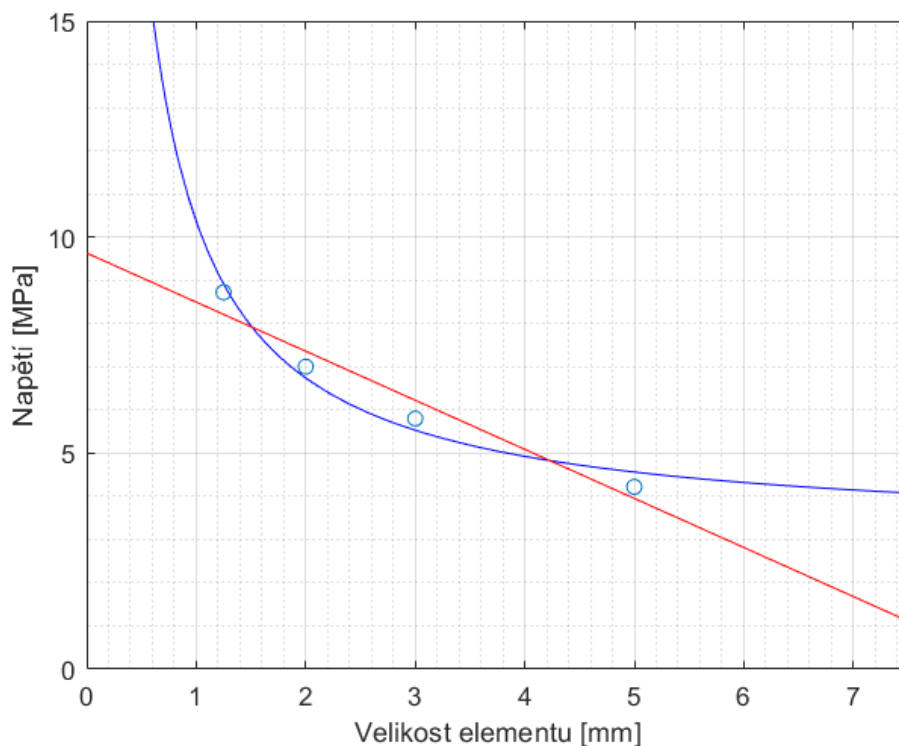
#### 4.6.2.3 Rameno



Obr. 40 Rozložení napětí ve vysouvacím rameni.

Z rozložení napětí lze opět vyvodit, že maximální napětí se vyskytuje na ostré hraně a místě kontaktu s pouzdem. Skutečné napětí by ve skutečnosti mělo být nižší vzhledem k výrobní vůli a také proto, že na výtisku nebude tato hrana takto ostrá.

Opět je možné vytvořit aproximaci:



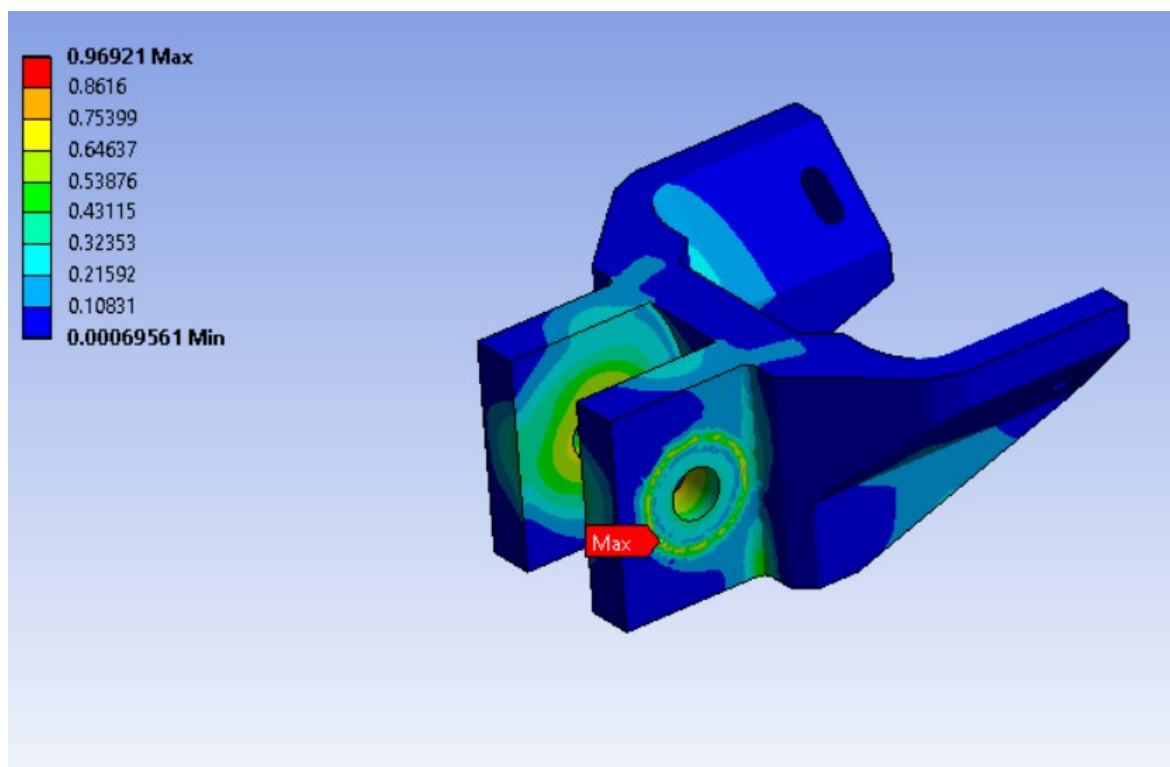
Graf 5 Aproximace napětí v místě dotyku ramene s pouzdem pro rameno. Modrá křivka značí aproximaci pomocí funkce  $x^{-1}$  a červená čára značí lineární aproximaci. Modré kroužky značí hodnotu napětí pro konkrétní síť.

Opět se jedná o stejný případ jako v Graf 4. Z širšího úhlu pohledu se zde s nejvyšší pravděpodobností nachází kritické místo celé sestavy, jelikož i lineární aproximace ukazuje skutečné napětí přibližně 9,5 MPa. V úvodu jsem sice zmínil, že vlivem výrobních vůlí i technologií nemusí být výsledné napětí takto vysoké, avšak může zde být nejvyšší napětí v sestavě.

Každopádně se zde nejedná o namáhání v tahu, nýbrž v tlaku, což snižuje riziko případného poškození, a to i pro vyšší hodnoty napětí.

#### 4.6.2.4 Držák termokamery

Pro držák termokamery vycházejí následující hodnoty napětí pro velmi jemnou síť:



Obr. 41 Rozložení napětí v držáku termokamery.

Vzhledem k maximální hodnotě napětí, která dosahuje necelého 1 MPa, není nutné provádět aproximaci, jako v předchozích krocích. V porovnání s mezí kluzu lze konstatovat, že držák termokamery je z hlediska napětí předimenzovaný.

## 5 Příprava CAD modelu pro 3D tisk

Celá sestava, kromě matic, šroubů a osy, bude vytištěna pomocí metody 3D tisku. Oproti sestavě výpočtové jsou všechny modely změněny pouze o vůli kvůli smontovatelnosti. Vůle činí v případě symetrie 0,3–0,4 mm tzn., že modely mají celkové rozměry menší o 0,6–0,8 mm.

Přesto v případě, že požadovaná vůle nebude splněna, je možné upravit rozměry jemným obroušením, což by mělo vytvořit požadované vůle.

Z důvodu šetření materiálu při tisku se modely vyplňují v příčných softwarech pro 3D tiskárny voštinami, které šetří materiál (filament), čas i tedy peníze. Voštiny by měly být navrženy tak, aby úbytek tuhosti oproti plnému modelu byl minimální. Na základě této podmínky jsem v softwaru Patran provedl několik výpočtů zkoumající voštiny vzoru grid, což jsou vizuálně čtverce, avšak vznikají jinou metodou, a tudíž ponechám označení grid, a vzor trojúhelník. Dále jsem zkoumal tloušťku stěny voštin, tloušťku stěny vnějšího pláště.[15]

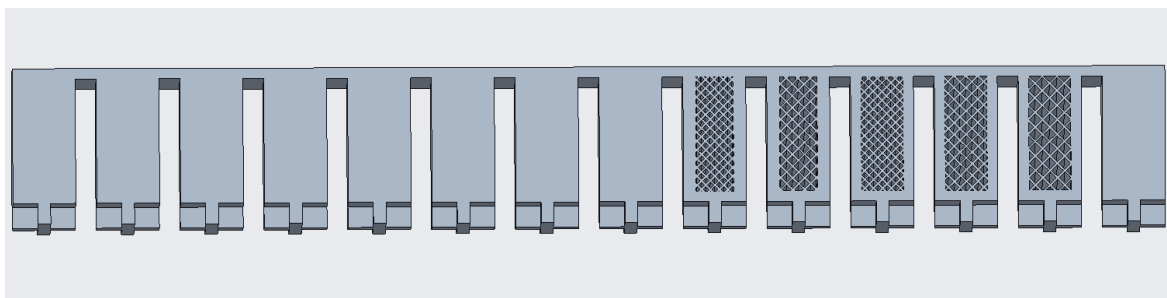
### 5.1 Výpočet voštin

V softwaru Creo Parametric jsem si vytvořil „hřeben“ tvořený tělesy s voštinami, přičemž každé těleso mělo jiné parametry. Následně jsem provedl MKP simulaci, ve které jsem zkoumal posunutí konce tělesa v určitém směru a porovnával jej s posunutím plného tělesa. Použil jsem pro výpočet stejná data jako jsou v Tab. 9.

Na každý model jsem aplikoval referenční sílu 20 N ve směrech x a z, přičemž na druhém konci byl model vetknutý. Následně ve výsledcích jsem zkoumal posunutí ve směru os x a z. Všechny modely byly vysítovány sítí stejné velikosti (2,5 mm) a stejné topologie, konkrétně tetraedry s meziuzly (Tet10). V místě voštin software provedl automatické zhuštění sítě.

#### 5.1.1 Voštiny vzoru grid s tryskou Ø 0,5 mm

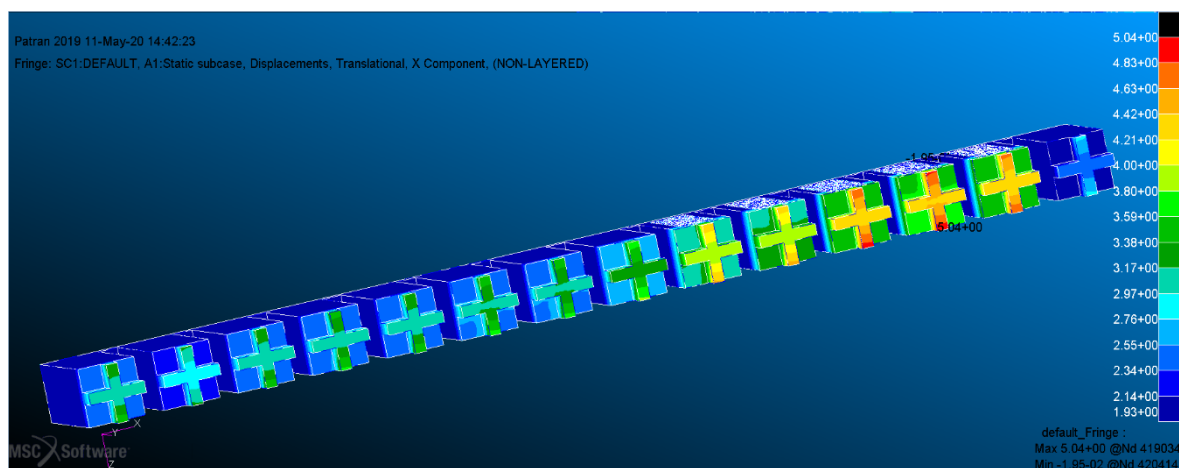
Výpočetní model:



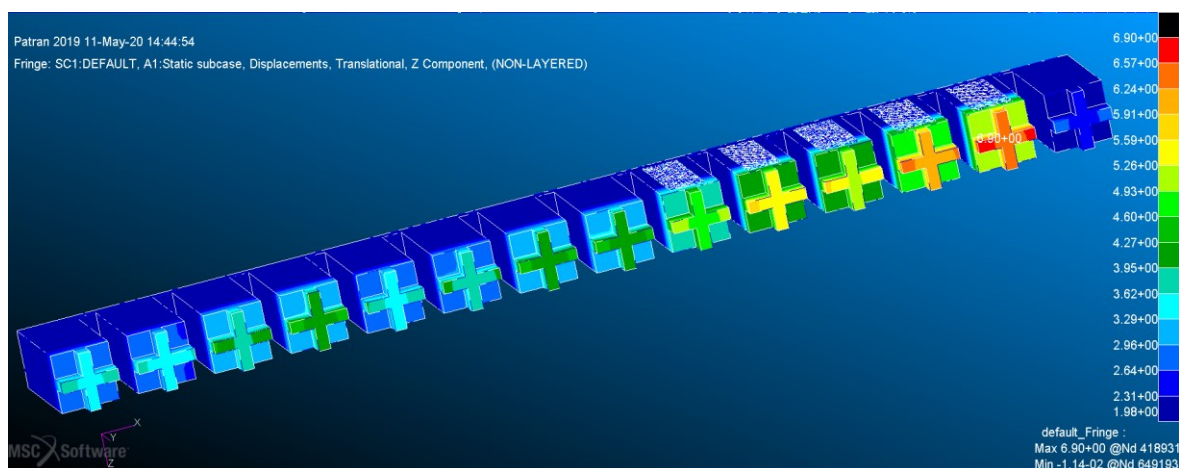
Obr. 42 Vizualizace výpočtového modelu voštin pro analýzu změny tuhosti.



Výsledná posunutí poté byla:



Obr. 44 Posunutí těles s voštinami grid v ose x pro zatížení v ose x. Tryska 0,5 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.



Obr. 43 Posunutí těles s voštinami grid v ose z pro zatížení v ose z. Tryska 0,5 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.

Tabulkovou formou:

Tab. 10 Změna tuhosti v závislosti na vzdálenosti voštin (mezera), tloušťce okrajů, tloušťce horní a spodní vrstvy a následné posunutí ve směrech x a z pro trysku 0,5 mm a voštiny vzoru grid. Poté vyhodnocení procentuálního snížení tuhosti vůči plnému modelu.

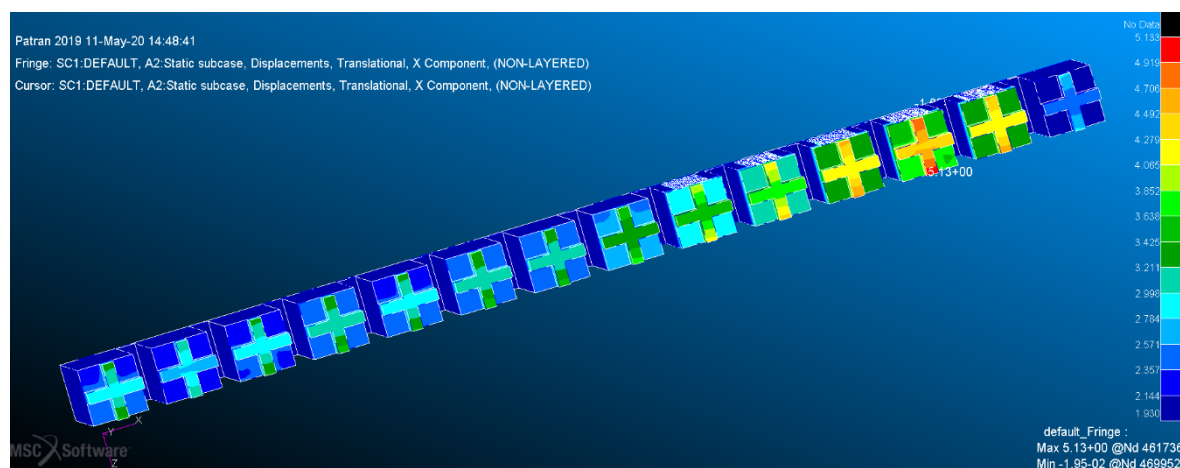
číslo	mezera [mm]	okraje [mm]	horní/spodní vrstva [mm]	posunutí x [mm]	posunutí z [mm]	snížení tuhosti x [%]	snížení tuhosti z [%]
1	plný	plný	plný	1.93	1.97	-	-
2	2.5	2.5	0	3.47	5.11	<b>80</b>	<b>159</b>
3	2	2.5	0	3.57	4.78	<b>85</b>	<b>143</b>
4	1.5	2.5	0	3.48	4.16	<b>80</b>	<b>111</b>
5	2	3	0	3.16	4.21	<b>64</b>	<b>114</b>
6	1.5	3	0	3.13	3.79	<b>62</b>	<b>92</b>
7	2	2.5	1	2.66	3.26	<b>38</b>	<b>65</b>
8	1.5	2.5	1	2.51	3.23	<b>30</b>	<b>64</b>
9	2	2.5	2	2.41	2.94	<b>25</b>	<b>49</b>
10	1.5	2.5	2	2.49	2.81	<b>29</b>	<b>43</b>
11	2	3	1	2.41	3.25	<b>25</b>	<b>65</b>
12	1.5	3	1	2.4	3.09	<b>24</b>	<b>57</b>
13	2	3	2	2.26	2.67	<b>17</b>	<b>36</b>
14	1.5	3	2	2.4	2.78	<b>24</b>	<b>41</b>

Nejmenší snížení tuhosti nastalo pro číslo 13 ve směru posunutí v ose x. s mezerou 2 mm, okraji 3 mm, horní a spodní vrstvou 2 mm. Toto těleso v obou osách vykazovalo nejmenší snížení tuhosti.

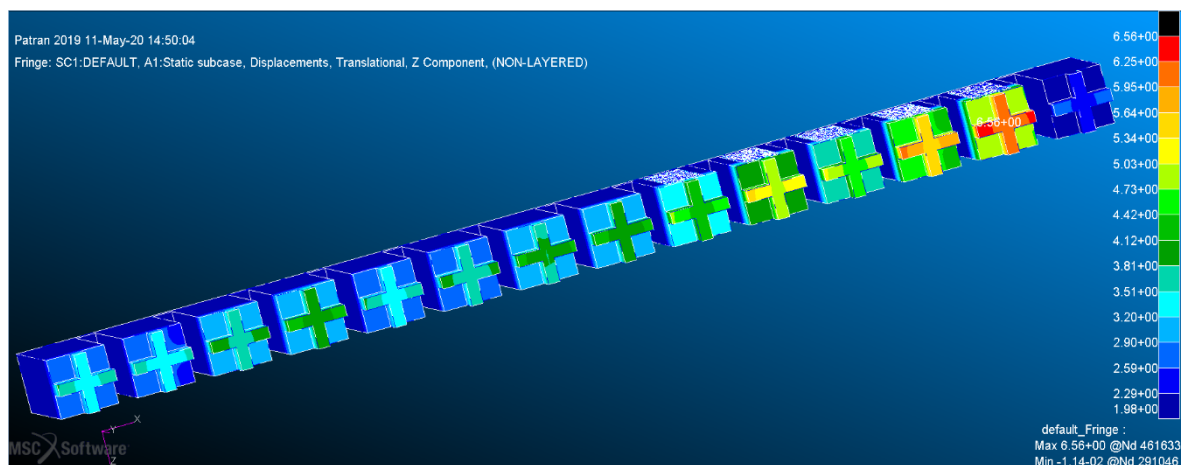
### 5.1.2 Voštiny vzoru grid s tryskou Ø 0,6 mm

Jedná se o podobný obrázek jako Obr. 42, ale tloušťka voštin je 0,6 mm. Okraje jsou násobkem průměru trysky, tudíž se změnily okraje z 2,5 mm na 2,4 mm.

Výsledky posunutí:



Obr. 45 Posunutí těles s voštinami grid v ose x pro zatížení v ose x. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.



Obr. 46 Posunutí těles s voštinami grid v ose z pro zatížení v ose z. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.

Formou tabulky:

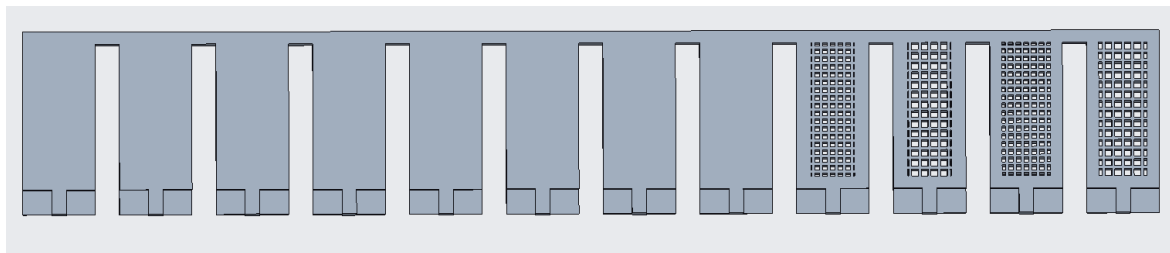
Tab. 11 Změna tuhosti v závislosti na vzdálenosti voštin (mezera), tloušťce okrajů, tloušťce horní a spodní vrstvy a následné posunutí ve směrech x a z pro trysku 0,6 mm a voštiny vzoru grid. Poté vyhodnocení procentuálního snížení tuhosti vůči plnému modelu.

číslo	mezera [mm]	okraje [mm]	horní/spodní vrstva [mm]	posunutí x [mm]	posunutí z [mm]	snížení tuhosti x [%]	snížení tuhosti z [%]
1	plný	plný	plný	1,93	1,97	-	-
2	2,5	2,4	0	3,31	4,83	<b>72</b>	<b>145</b>
3	2	2,4	0	3,60	4,45	<b>87</b>	<b>126</b>
4	1,5	2,4	0	3,31	3,68	<b>72</b>	<b>87</b>
5	2	3	0	3,04	3,97	<b>58</b>	<b>102</b>
6	1,5	3	0	2,85	3,44	<b>48</b>	<b>75</b>
7	2	2,4	1	2,57	3,14	<b>33</b>	<b>59</b>
8	1,5	2,4	1	2,40	3,04	<b>24</b>	<b>54</b>
9	2	2,4	2	2,46	2,86	<b>27</b>	<b>45</b>
10	1,5	2,4	2	2,33	2,70	<b>21</b>	<b>37</b>
11	2	3	1	2,43	3,15	<b>26</b>	<b>60</b>
12	1,5	3	1	2,32	2,94	<b>20</b>	<b>49</b>
13	2	3	2	2,21	2,61	<b>15</b>	<b>32</b>
14	1,5	3	2	2,34	2,69	<b>21</b>	<b>37</b>

Opět dochází ke stejnému výsledku, že těleso se skoro stejnými parametry ale větší tryskou, má nejmenší tuhost a od trysky s průměrem 0,5 mm se liší pouze o 2 %.

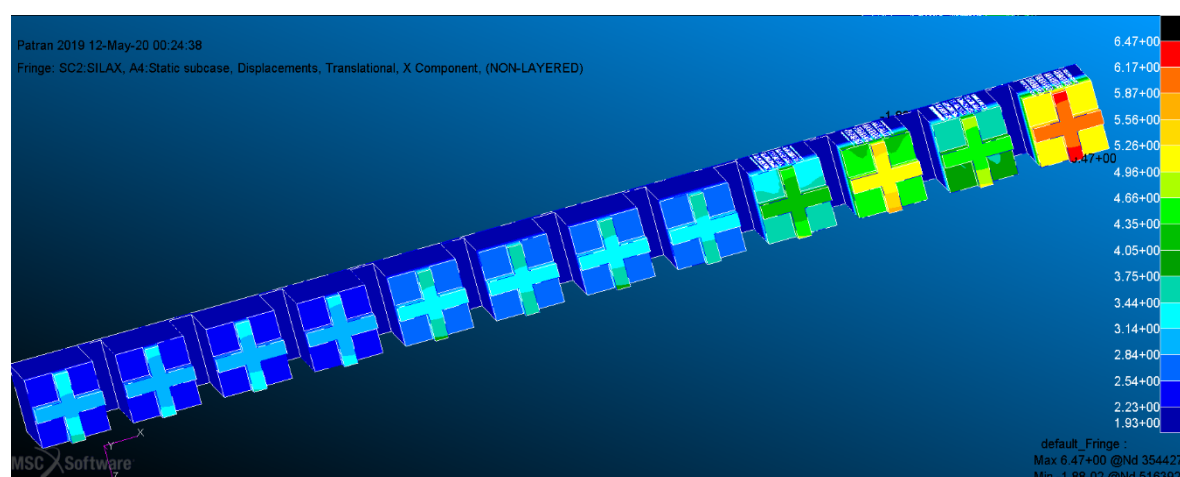
### 5.1.3 Voštiny vzoru grid s natočením o 45° s tryskou Ø 0,6 mm

Z hlediska změny mechanických vlastností jsem změnil i natočení voštin, jejichž okraje jsou rovnoběžné či kolmé na stěny obvodu. Kvůli ušetření výpočetního času jsem již nezahrnul plné těleso a také těleso s největší vzdáleností voštin, jelikož pro plné těleso jsem již výsledky a pro druhé jmenované výsledky nebyly uspokojivé.

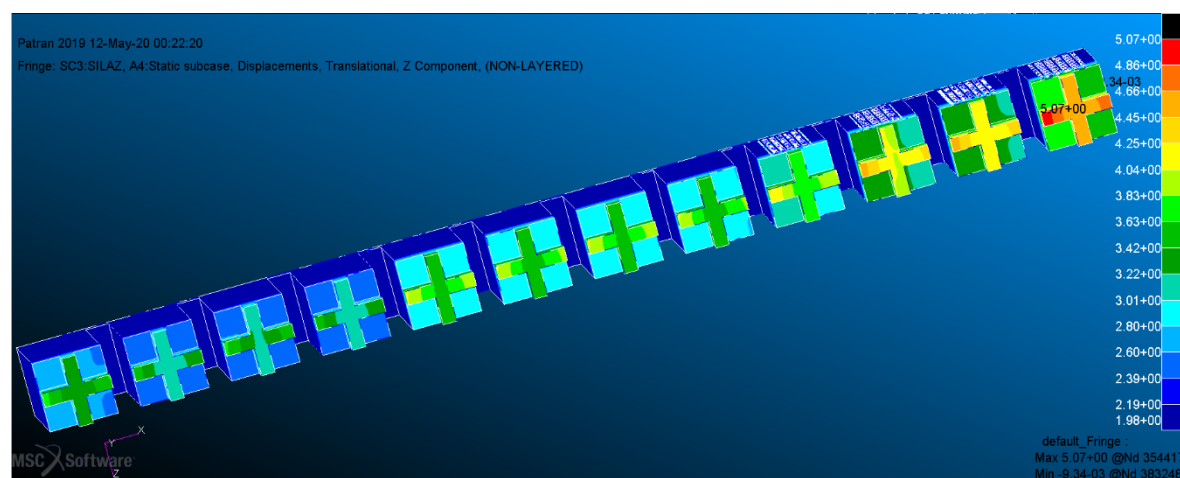


Obr. 47 Vizualizace výpočtového modelu s natočenými voštinami grid

Na základě výpočtů vyšly tyto výsledky posunutí:



Obr. 48 Posunutí těles s natočenými voštinami grid v ose x pro zatížení v ose x. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.



Obr. 49 Posunutí těles s natočenými voštinami grid v ose z pro zatížení v ose z. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.

Formou tabulky:

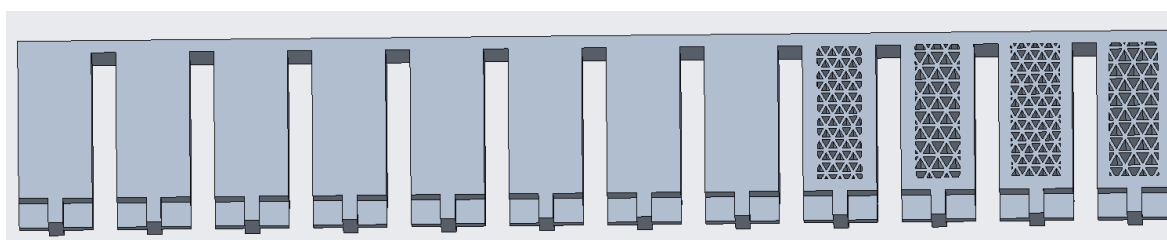
Tab. 12 Změna tuhosti v závislosti na vzdálenosti natočených voštin (mezera), tloušťce okrajů, tloušťce horní a spodní vrstvy a následné posunutí ve směrech x a z pro trysku 0,6 mm a voštiny vzoru grid. Poté vyhodnocení procentuálního snížení tuhosti vůči plnému modelu.

číslo	mezera [mm]	okraje [mm]	horní/spodní vrstva [mm]	posunutí x [mm]	posunutí z [mm]	snížení tuhosti x [%]	snížení tuhosti z [%]
1	2	2,4	0	5,13	3,65	166	85
2	1,6	2,4	0	3,70	3,29	92	67
3	2	3	0	4,37	3,27	126	66
4	1,6	3	0	3,43	3,02	78	53
5	2	2,4	1	2,79	2,87	45	46
6	1,6	2,4	1	2,69	2,90	39	47
7	2	3	1	2,78	2,87	44	46
8	1,6	3	1	2,68	2,90	39	47
9	2	2,4	2	2,35	2,48	22	26
10	1,6	2,4	2	2,39	2,57	24	30
11	2	3	2	2,35	2,48	22	26
12	1,6	3	2	2,47	2,61	28	32

Při porovnání výsledků s předchozími, tento typ natočení voštin je nevyhovující a má dokonce horší vlastnosti než tisk s užší tryskou.

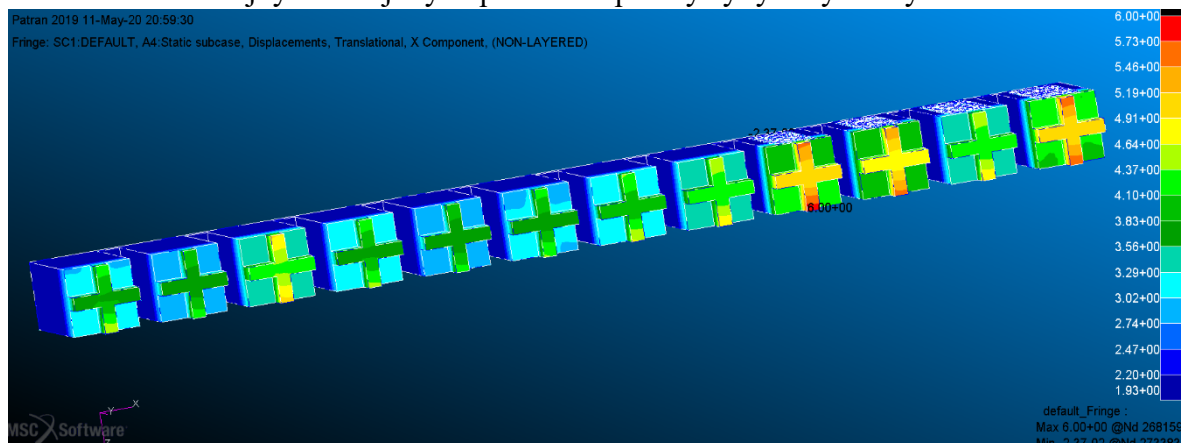
#### 5.1.4 Voštiny vzoru trojúhelník s tryskou Ø 0,6 mm

Vyzkoušel jsem vypočítat i další vzor voštin hojně používaný z hlediska rychlosti tisku a jednoduchosti. Vizualně model vypadal následovně:

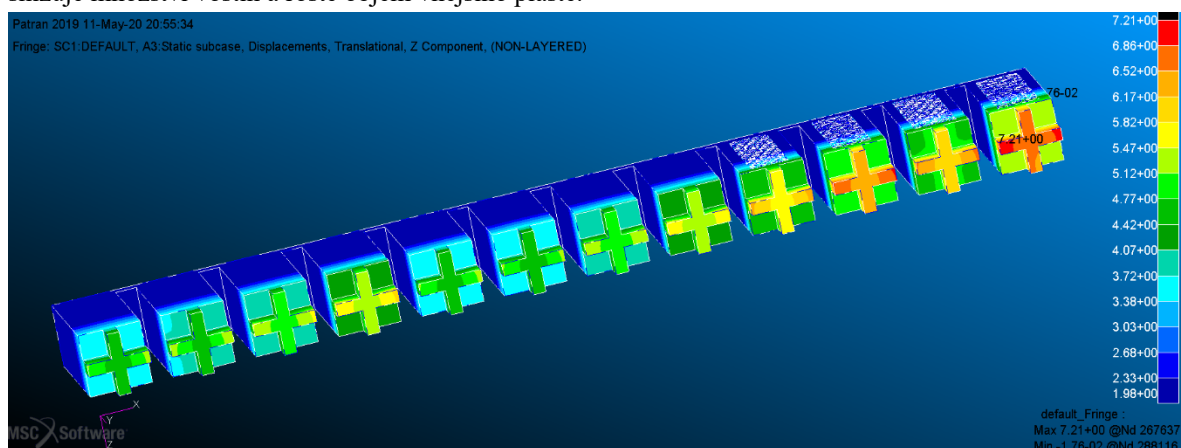


Obr. 50 Vizualizace výpočtového modelu s voštinami trojúhelníků

Na základě stejných okrajových podmínek pak vyšly tyto výsledky:



Obr. 52 Posunutí těles s voštinami trojúhelník v ose x pro zatížení v ose x. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.



Obr. 51 Posunutí těles s voštinami trojúhelník v ose z pro zatížení v ose z. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.

Formou tabulky:

Tab. 13 Změna tuhosti v závislosti na vzdálenosti voštin trojúhelník (mezera), tloušťce okrajů, tloušťce horní a spodní vrstvy a následné posunutí ve směrech x a z pro trysku 0,6 mm a voštiny vzoru grid. Poté vyhodnocení procentuálního snížení tuhosti vůči plnému

číslo	mezera [mm]	okraje [mm]	horní/spodní vrstva [mm]	posunutí x [mm]	posunutí z [mm]	snížení tuhosti x [%]	snížení tuhosti z [%]
1	3	2,4	0	4,11	5,24	<b>113</b>	<b>166</b>
2	2,4	2,4	0	3,33	4,76	<b>73</b>	<b>142</b>
3	3	3	0	3,94	5,01	<b>104</b>	<b>154</b>
4	2,4	3	0	4,01	4,50	<b>108</b>	<b>128</b>
5	3	2,4	1	3,33	4,14	<b>73</b>	<b>110</b>
6	2,4	2,4	1	3,14	3,88	<b>63</b>	<b>97</b>
7	3	3	1	3,01	3,66	<b>56</b>	<b>86</b>
8	2,4	3	1	2,86	3,65	<b>48</b>	<b>85</b>
9	3	2,4	2	3,07	4,20	<b>59</b>	<b>113</b>
10	2,4	2,4	2	3,50	3,91	<b>81</b>	<b>98</b>
11	3	3	2	2,90	3,73	<b>50</b>	<b>89</b>
12	2,4	3	2	3,04	3,64	<b>58</b>	<b>85</b>

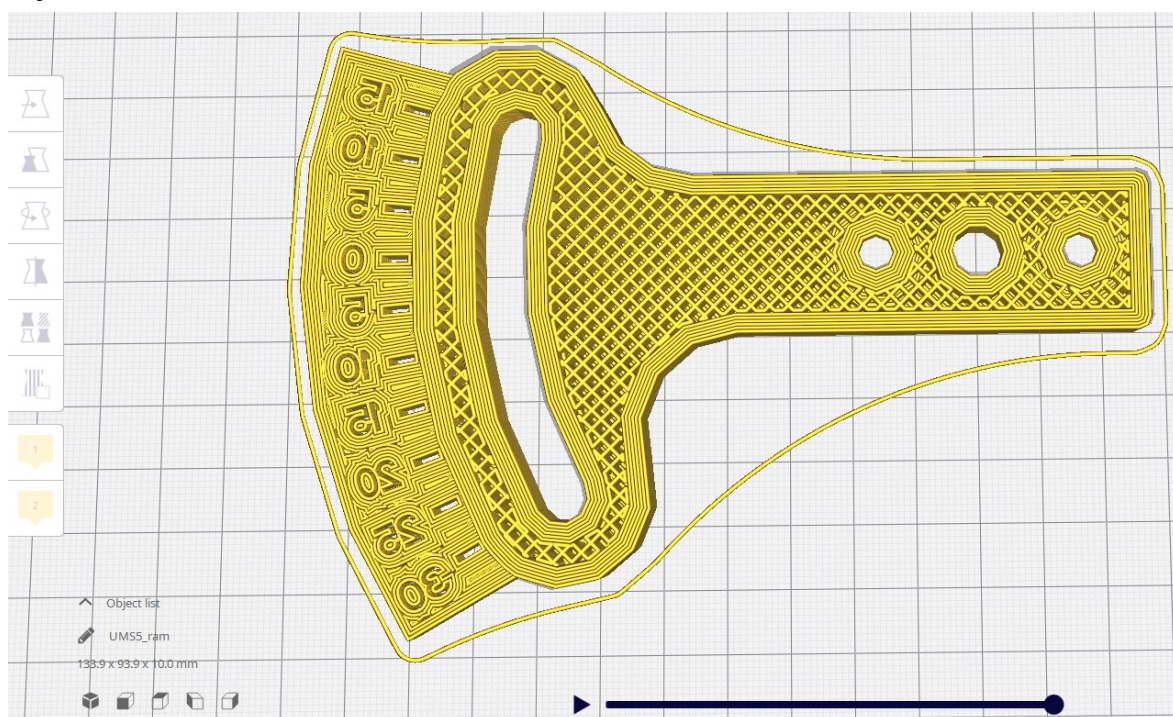


V porovnání s ostatními voštinami vyšel tento vzor ze všech nejhůře a je tedy nejméně vhodný k použití. Nicméně je překvapivé, že zrovna těleso číslo 8 vykazovalo nejlepší vlastnosti, kdežto u vzoru grid to bylo těleso 13.

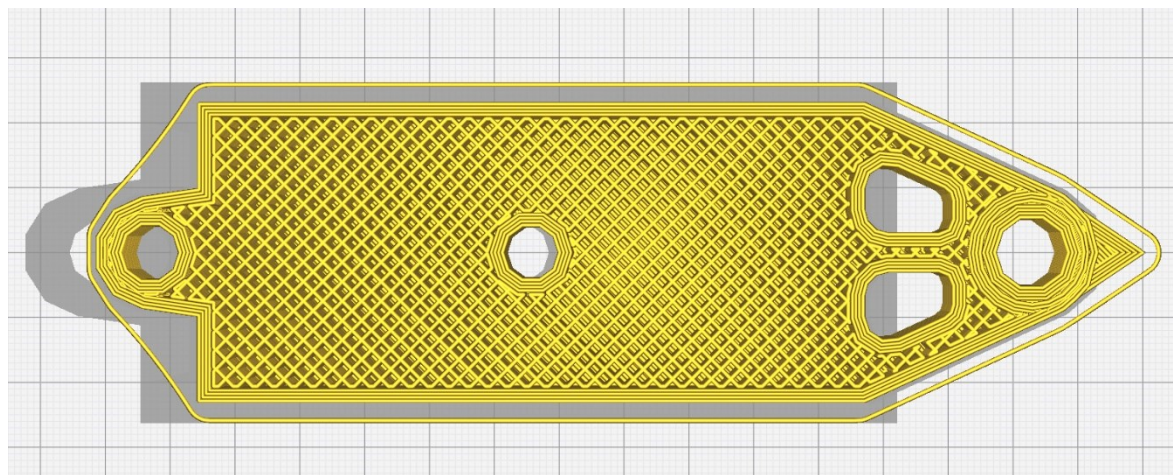
Na základě zpracovaných analýz doporučuji tisk tryskou s průměrem 0,6 mm, voštinami typu grid, mezerou 2 mm, tloušťkou stěn minimálně 3 mm a s uzavřenou horní a spodní částí o tloušťce minimálně 2 mm.[15]

## 5.2 Vizualizace vytištěných součástí

Vizualizaci součástí jsem provedl v softwaru Ultimaker Cura. Na základě předchozích výpočtů volím vyšší tloušťku okrajů a umísťuji tělesa do takové polohy, aby měla co nejmenší změnu tuhosti.

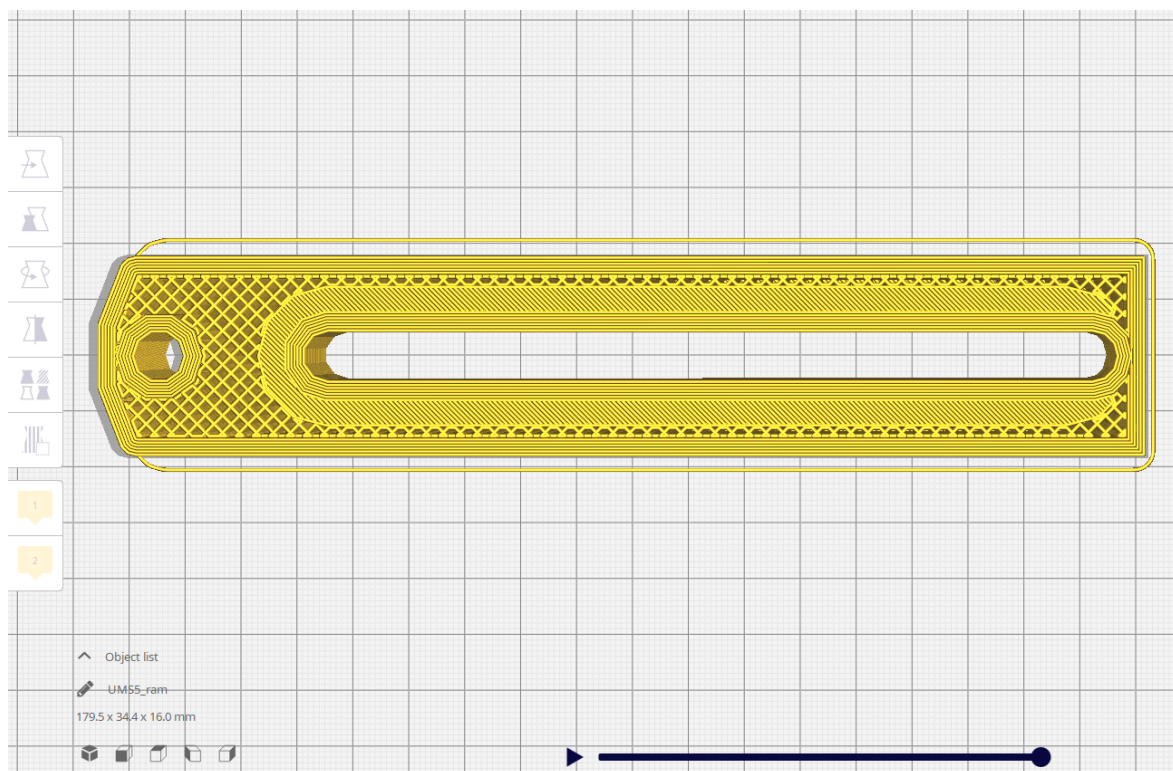


Obr. 54 Podoba držáku se stupnicí včetně voštin (v řezu).

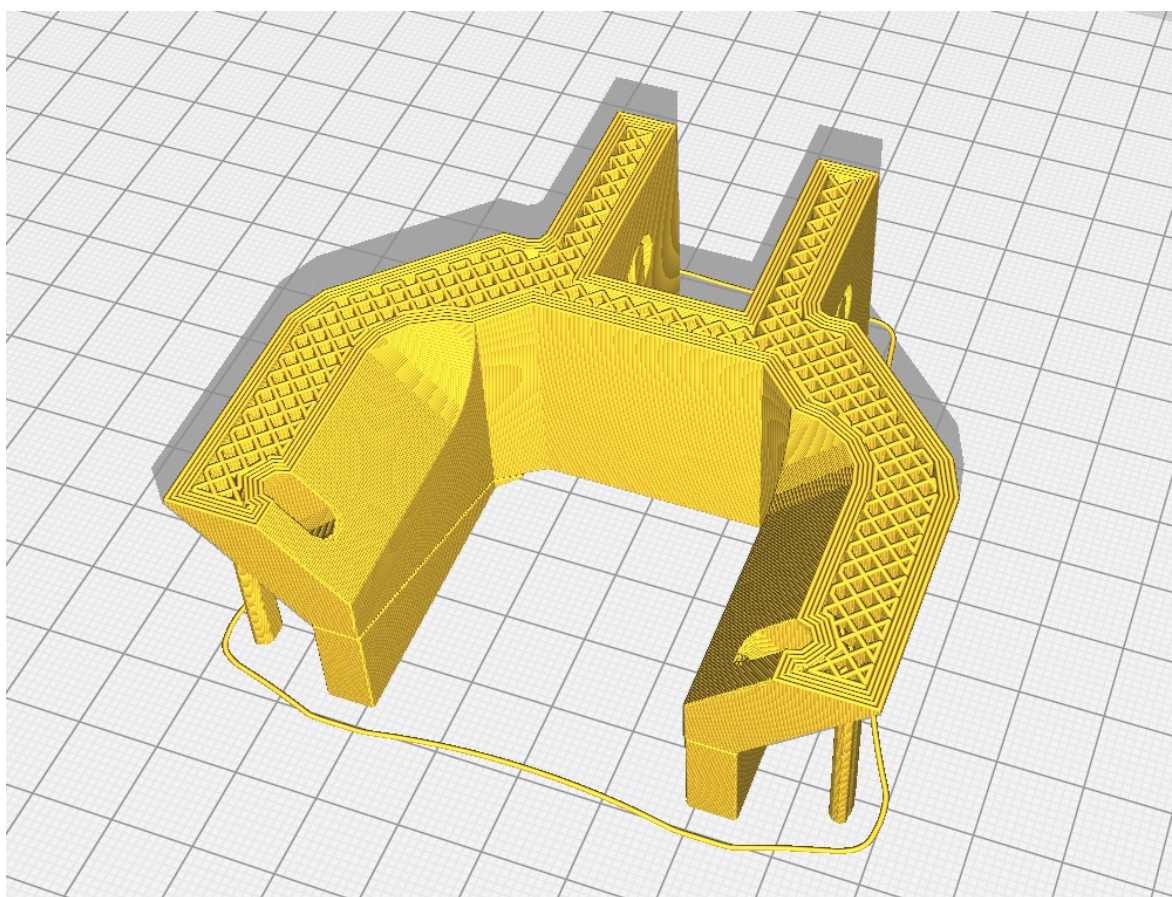


Obr. 53 Podoba pouzdra včetně voštin (v řezu)





Obr. 56 Podoba vysouvacího ramene včetně voštin (v řezu)



Obr. 55 Podoba držáku termokamery včetně voštin a podpor (v řezu)



## 6 Verifikace prototypu

Navržený model plně vyhovuje zadaným požadavkům a lze jej použít ke stanovenému účelu, k uchycení termokamery.

### 6.1 Zlepšení mechanických vlastností

Vzhledem k použití voštin při 3D tisku lze očekávat snížení tuhosti všech částí a tím i zvýšení hodnoty deformace. Konkrétně pro doporučené voštiny by se mohlo celkové posunutí změnit o 15 % (viz Tab. 11), což by konkrétně bylo:

$$y_{max} = 3,8 \cdot 1,15 \cong 4,4 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Tato hodnota je stále přijatelná z hlediska deformace, jelikož může dojít k jejímu vykompenzování úpravou natočení držáku termokamery. Nicméně vliv voštin na napětí v určitých místech může mít negativní vliv a byla by potřeba určitá úprava, která by snížila velikost namáhání.

Jednou z možných úprav může být vyztužení okrajů součástí kevlarovými či uhlíkovými vlákny, která by dokázaly snížit nejen napětí, ale i deformace a mohlo by se dokonce uvažovat o redukci rozměrů jednotlivých dílů, jelikož z důvodů nevyhovujících výpočtů, které zde nejsou publikovány, jelikož nejsou relevantní, musely být některé rozměry zvětšeny.

Plastic Matrix	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Nylon W
Tensile Modulus (GPa)	D638	1.4	1.3	1.7
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	36	29	51
Tensile Strain at Yield (%)	D638	25	33	4.5
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	30	31	36
Tensile Strain at Break (%)	D638	58	58	150
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	81	79	50
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	3.6	4.0	1.4
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	41
Flame Resistance	UL94	—	V-0 <sup>2</sup>	—
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	—	110
Density (g/cm <sup>3</sup> )	—	1.2	1.2	1.1
Fiber Reinforcement	Test (ASTM)	Carbon	Kevlar®	
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	610	
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	27	
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	2.7	
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	540	240	
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	51	26	
Flexural Strain at Break (%)	D790 <sup>1</sup>	1.2	2.1	
Compressive Strength (MPa)	D6641	320	97	
Compressive Modulus (MPa)	D6641	54	28	
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	1.5	
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	2000	
Density (g/cm <sup>3</sup> )	—	1.4	1.2	

Obr. 57 Mechanické vlastnosti materiálů pro vytvoření kompozitu. Nahoře vlastnosti matric a dole vlastnosti výztuží. Zdroj: <http://static.markforged.com/downloads/composites-data-sheet.pdf>

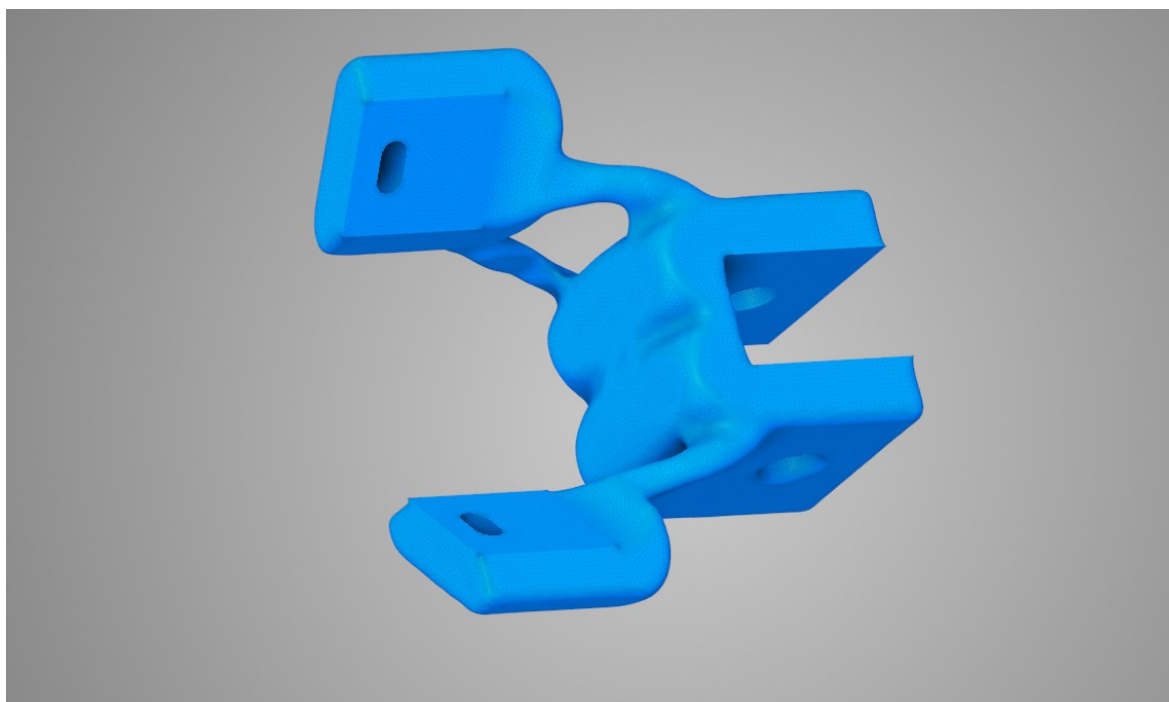
Pro takto upravený kompozitní materiál by bylo potřeba udělat nové zkoušky a detailněji se tímto materiálem zabývat. Taktéž výpočet by byl náročnější, jelikož takový kompozit by měl v různých směrech různé vlastnosti, a i z tohoto důvodu by bylo potřeba vytisknout daleko větší množství vzorků pro statistické zpracování dat mechanických vlastností.

## 6.2 Úprava geometrie modelu

V kapitole 3.2 je v požadavcích řečeno, že by bylo vhodnější jinak vymyslet přichycení termokamery k držáku, jelikož navržený tvar je velice obecný. Ve výpočtu MKP je pak ve výsledcích vidět, že držák termokamery je z hlediska napětí dosti předimenzovaný (viz Obr. 41) a bylo by možné ušetřit na materiálu.

Možným řešením je topologická optimalizace držáku termokamery, která upraví geometrii na základě požadavků, aby přesto vyhovovala pevnostním nárokům.

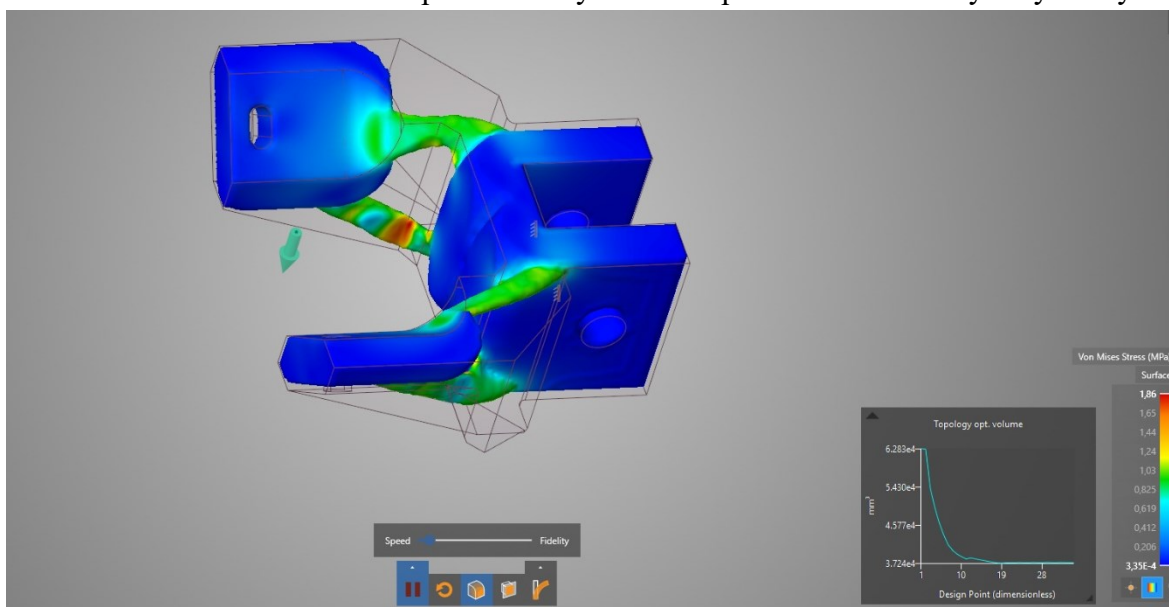
Topologická optimalizace byla provedena přímo na modelu znázorněném na Obr. 16 pro zatížení 20 N kvůli vyšší bezpečnosti. Výsledkem je tato úprava držáku:



Obr. 58 Geometrie držáku termokamery po topologické optimalizaci.

Topologická optimalizace byla nastavena tak, aby změnila pouze uchycení opěrných držáků k rámu, přičemž mělo dojít k redukci objemu vůči počátečnímu modelu o 40 %. Taktéž došlo k celkovému vyhlazení celé geometrie.

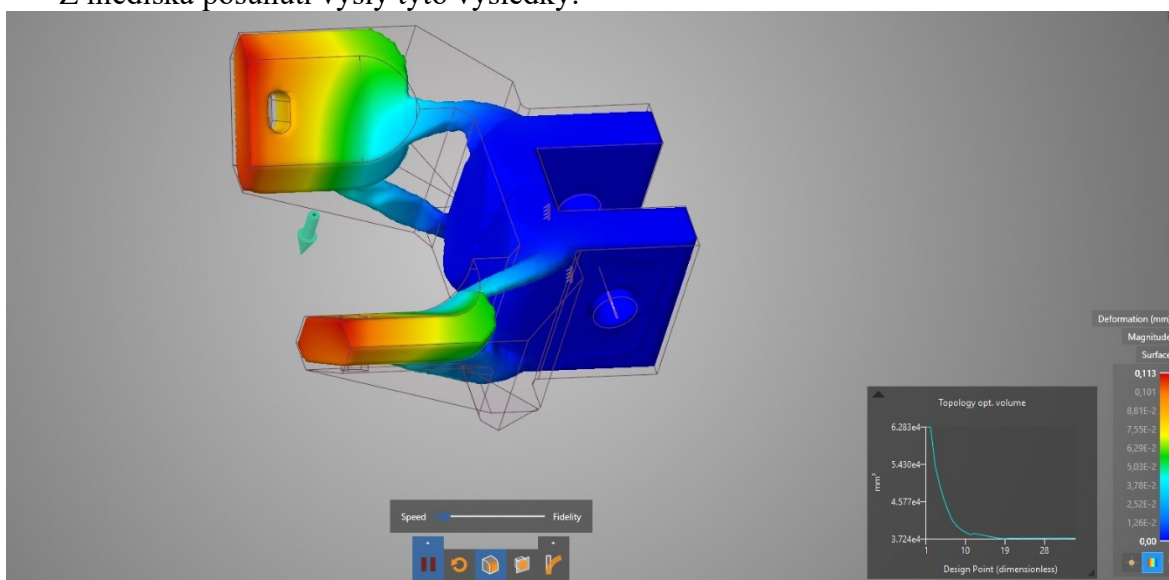
Z hlediska redukovaného napětí HMH vychází na upraveném modelu tyto výsledky:



Obr. 59 Napětí na upravené geometrii

Na Obr. 59 lze vidět, že největší napětí se nachází na ramenech držící podpěry termokamery, ale dosahuje pouze 1,9 MPa, což je stále dostačující vůči mezi kluzu. Teoreticky by ještě šlo ubrat materiál z podpěr pro termokameru, ale to by vyžadovalo dobré zpracování geometrie termokamery.

Z hlediska posunutí vyšly tyto výsledky:



Obr. 60 Celkové posunutí modelu vlivem zatížení

Rovněž posunutí vyšlo velice malé odpovídající přibližně 0,1 mm v krajních částech držáku.

Tato geometrie by tedy byla vhodná pro nahrazení původního držáku termokamery, nicméně by muselo dojít k úpravám při tisku, jelikož by nemohlo dojít k umístění voštin do míst upravených topologickou optimalizací. Tyto části by však mohly být vytisknuty plně a voštiny by byly umístěny do minimálně ovlivněných částí, záleží pouze na nastavení příslušného softwaru pro 3D tisk.

## 7 Závěrečné zhodnocení

Tato práce se týkala návrhu uchycení termokamery pro termoelastická měření. Byly v ní popsány principy fungování jednotlivých senzorů snímající infračervené záření, ukázán návrh sestavy pro uchycení termokamery, navržená sestava byla kontrolována pomocí metody konečných prvků, vyhovující model byl převeden na formát pro 3D tisk a došlo k verifikaci prototypu.

V teoretické části byly popsány základy týkající se termálního snímání včetně principů fungování jednotlivých senzorů snímající infračervené záření. Byly popsány fotodetektory založené na detekci fotonů konkrétních vlnových délek i tepelné detektory fungující na základě zahřátí snímačů.

V praktické části jsem navrhl uchycení termokamery na základě zadaných požadavků, přičemž jsem vycházel z návrhu původního uchycení. Jeden z požadavků ale nemohl být splněn kvůli karanténním opatřením. Z jednotlivých částí jsem následně složil sestavu, která byla podrobena výpočtu pomocí metody konečných prvků. Mnou navržená sestava je sice větší a komplexnější než původní uchycení, ale umožňuje lepší nastavení pro přesnější a lepší měření. Kromě toho může být sestava použita i pro jiné přístroje, kdy stačí vyměnit držák termokamery za jinou součást.

Při simulaci MKP jsem kontroloval, zda navržená sestava vyhovuje z hlediska napětí a deformace. Některé části měly vysokou bezpečnost vůči mezi kluzu, některé části naopak měly malou bezpečnost, avšak z hlediska typu namáhání jsem je uznal jako vyhovující. Možnou nevýhodou při výpočtu byla absence voštin, které jsou součástí skutečného modelu. Voštiny totiž snižují tuhost a výsledky s plnými modely neodpovídají úplně skutečnosti. Výpočet s voštinami nemohl být proveden, poněvadž voštiny by způsobily takové zhuštění sítě, že by počet uzlů přesahoval dovolený počet daný licenci.

V bodě pro přípravu modelu na 3D tisk jsem provedl analýzu jednotlivých typů voštin, jelikož nemohly být použity přímo ve výpočtu sestavy. Z analýzy jsem poté stanovil optimální typ, velikost voštin a další parametry pro co nejnižší pokles tuhosti. Taktéž jsem přidal vizualizaci jednotlivých modelů při tisku.

Jelikož nebylo možné vytisknout sestavu včas z důvodu karantény, byl bod verifikace prototypu zaměřen hlavně na ještě další optimalizace mnou navrženého modelu. První optimalizací bylo vyztužení všech částí kevlarovými či uhlíkovými vlákny, která by zvýšila tuhost a případně snížila rozměry všech součástí. Další možnou optimalizací bylo provedení topologické optimalizace držáku termokamery pro snížení nákladu na tisk i odlehčení celé konstrukce.

## **8 Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Kořínkovi za vedení této práce a za pomoc při jejím vypracování. Doc. Ing. Radimu Halamovi Ph.D. za konzultace a domluvení 3D tisku součástí. Mému otci za výrobu všech kovových komponentů v navržené sestavě. Aničce Nezdařilové za poskytnutí její research licence pro software ANSYS Workbench při výpočtu modelu s velmi jemnou sítí.

## 9 Seznam obrázků

Obr. 1 Znázornění černého tělesa [2] .....	16
Obr. 2 Závislost spektrální hustoty vyzařování v závislosti na vlnové délce pro konkrétní teploty (nejedná se o konkrétní průběhy a hodnoty na svislé ose jsou čistě srovnávací) [1] .....	18
Obr. 3 Vizualizace Stefan-Boltzmannova zákona [1].....	19
Obr. 4 Srovnání citlivosti fotodetektoru a tepelného detektoru v závislosti na vlnové délce elektromagnetického záření. [5] .....	20
Obr. 5 (a) Znázornění jednotlivých pásem podle energetické struktury elektronového obalu. (b) Ukázka fungování vlastního fotorezistoru. (c) Ukázka fungování nevlastního fotorezistoru. [1]....	23
Obr. 6 Znázornění principu fotodiody, kdy dopadající foton generuje elektrický proud, detekovaný galvanometrem (napravo). [5] .....	24
Obr. 7 Demontrace Seebeckova jevu na vodičích se zahřátím na společném styku (černá tečka) na teplotu $T_1$ a s chlazením na svém druhém konci s teplotou $T_2$ , kde je rovněž měřeno termoelektrické napětí $V_{th}$ . Tento celek se celý označuje jako termočlánek [9] .....	26
Obr. 8 Struktura termoelektrického senzoru. Černý pás představuje absorbent, k němuž jsou připojeny termočlánky. [9].....	27
Obr. 9 Ukázka schémat zapojení (a) s předřadným rezistorem a konstantním zdrojovým napětím (b) jednoduché zapojení při konstantním elektrickém proudu [9].....	28
Obr. 10 Zjednodušená podoba bolometru. Absorpční plocha je doplněna o tepelný kapacitor k lepšímu ohřevu senzoru a pod ním se nachází zrcadlo, pro odraz vyzařovaného záření. [5] .....	30
Obr. 11 Schéma Golayova detektoru.....	31
Obr. 12 Původní model držáku termokamery, CAD model.....	32
Obr. 13 Fotografie původního držáku termokamery včetně voštin.....	32
Obr. 14 Biaxiální pulsator na jehož sloupu je připevněn držák termokamery. ....	33
Obr. 15 CAD model držáku se stupnicí. Otvory se zahlučením jsou pro uchycení šrouby ISO 1207-M5x16, díra mezi nimi slouží pro průchod osy a otvor napravo slouží pro pohyb polohovacího šroubu při natočení uchycením. ....	35
Obr. 16 CAD model držáku termokamery. Otvory napravo jsou pro spojení s ramenem. Zevnitř je nalepena guma zvětšující statický třecí koeficient. Ovalné otvory nalevo slouží pro šrouby při uložení termokamery do držáku.....	36
Obr. 17 CAD model pouzdra, ve kterém se posouvá rameno. Díra nalevo slouží pro zamezení samovolného posuvu ramene, díra uprostřed je pro osu a díra napravo se zahlučením je pro speciální matici od polohovací šroubu. Zadní stěna je zesílena kvůli většímu namáhání. ....	36
Obr. 18 CAD model vysouvacího ramene. Levá díra je pro šroubový spoj ramene s držákem termokamery. Otvor po délce slouží pro kompatibilitu s osou, který zamezuje přílišné vysunutí a zároveň snižuje namáhání pouzdra. Zahlučení je kvůli podložkám.....	36
Obr. 19 CAD model podložky pro sestavu.....	37
Obr. 20 CAD model speciálního šroubu, jenž je součástí sestavy. Závit není tímto softwarem vykreslen. Ostatní šrouby jsou podobné, mají jen rozdílnou délku. ....	37
Obr. 21 CAD model speciální matice pro poudro. ....	38
Obr. 22 CAD modely křídlaté matice a samojistné matice.....	38
Obr. 23 CAD model celé sestavy plně vysunutý (2 protilehlé pohledy).....	39
Obr. 24 CAD model sestavy při zasunutí ramene.....	39

Obr. 25 CAD model v řezu při plném vysunutí a zároveň natočení o 30°, přičemž držák je ve vodorovné poloze.....	40
Obr. 26 Upravený výpočtový model .....	41
Obr. 27 Znázornění hrubého kontaktu mezi maticí a pouzdrém.....	43
Obr. 28 Zmenšení elementů v místech třecích kontaktů.....	44
Obr. 29 Zobrazení místa vetknutí nahrazující přišroubování k objímce .....	45
Obr. 30 Cylindrická vazba v řezu aplikovaná na zaoblené zakončení otvoru vysouvacího ramene, díry v pouzdru a podložku.....	45
Obr. 31 Ukázka umístění aplikace síly od termokamery .....	46
Obr. 32 Předpětí ve šroubu držáku termokamery .....	47
Obr. 33 Předpětí ve šroubu od držáku se stupnicí .....	48
Obr. 34 Deformace a hodnota posunutí vlivem zatížení sestavy pro velmi jemnou síť .....	48
Obr. 35 Rozložení redukovaného napětí v celém modelu. ....	49
Obr. 36 Napětí v díře se zahloubením pro šroub v místě ostrého přechodu. Zobrazené hodnoty mají jednotku MPa.....	50
Obr. 37 Napětí v místě předejpatého šroubu. ....	51
Obr. 38 Rozložení napětí na tělese pouzdra .....	52
Obr. 39 Místo s maximálním napětím pro pouzdro .....	52
Obr. 40 Rozložení napětí ve vysouvacím rameni. ....	53
Obr. 41 Rozložení napětí v držáku termokamery. ....	55
Obr. 42 Vizualizace výpočtového modelu voštin pro analýzu změny tuhosti. ....	56
Obr. 43 Posunutí těles s voštinami grid v ose z pro zatížení v ose z. Tryska 0,5 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště. ....	57
Obr. 44 Posunutí těles s voštinami grid v ose x pro zatížení v ose x. Tryska 0,5 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště. ....	57
Obr. 45 Posunutí těles s voštinami grid v ose x pro zatížení v ose x. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště. ....	58
Obr. 46 Posunutí těles s voštinami grid v ose z pro zatížení v ose z. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště. ....	59
Obr. 47 Vizualizace výpočtového modelu s natočenými voštinami grid .....	60
Obr. 48 Posunutí těles s natočenými voštinami grid v ose x pro zatížení v ose x. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.....	60
Obr. 49 Posunutí těles s natočenými voštinami grid v ose z pro zatížení v ose z. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.....	60
Obr. 50 Vizualizace výpočtového modelu s voštinami trojúhelník .....	61
Obr. 52 Posunutí těles s voštinami trojúhelník v ose z pro zatížení v ose z. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.....	62
Obr. 51 Posunutí těles s voštinami trojúhelník v ose x pro zatížení v ose x. Tryska 0,6 mm. Zprava doleva se snižuje množství voštin a roste objem vnějšího pláště.....	62
Obr. 54 Podoba pouzdra včetně voštin (v řezu).....	63
Obr. 53 Podoba držáku se stupnicí včetně voštin (v řezu). ....	63
Obr. 55 Podoba držáku termokamery včetně voštin a podpor (v řezu).....	64

Obr. 56 Podoba vysouvacího ramene včetně voštin (v řezu).....	64
Obr. 57 Mechanické vlastnosti materiálů pro vytvoření kompozitu. Nahoře vlastnosti matric a dole vlastnosti výztuží. Zdroj: <a href="http://static.markforged.com/downloads/composites-data-sheet.pdf">http://static.markforged.com/downloads/composites-data-sheet.pdf</a> .....	65
Obr. 58 Geometrie držáku termokamery po topologické optimalizaci. ....	66
Obr. 59 Napětí na upravené geometrii.....	67
Obr. 60 Celkové posunutí modelu vlivem zatížení.....	67



## 10 Seznam tabulek

Tab. 1 Spektrum EM záření .....	14
Tab. 2 Rozdělení infračerveného spektra dle [5] .....	15
Tab. 3 Rozdělení infračerveného spektra dle [8] .....	15
Tab. 4 Rozdělení infračerveného záření dle zachytitelnosti senzory podle [5] .....	16
Tab. 5 Termoelektrické napětí za teploty 273 K a teplotním gradientu 100 K [9] .....	26
Tab. 6 Hodnoty Seebeckových koeficientů pro polovodiče a kovy. N znamená polovodič typu N, P polovodič typu P, poly – polykrystalický. [9] .....	27
Tab. 7 Hodnoty teplotních součinitelů elektrického odporu pro vybrané materiály [9] .....	30
Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 12 060 .....	42
Tab. 9 Mechanické vlastnosti materiálu onyx .....	42
Tab. 10 Změna tuhosti v závislosti na vzdálenosti voštin (mezera), tloušťce okrajů, tloušťce horní a spodní vrstvy a následné posunutí ve směrech x a z pro trysku 0,5 mm a voštiny vzoru grid. Poté vyhodnocení procentuálního snížení tuhosti vůči plnému modelu. ....	58
Tab. 11 Změna tuhosti v závislosti na vzdálenosti voštin (mezera), tloušťce okrajů, tloušťce horní a spodní vrstvy a následné posunutí ve směrech x a z pro trysku 0,6 mm a voštiny vzoru grid. Poté vyhodnocení procentuálního snížení tuhosti vůči plnému modelu. ....	59
Tab. 12 Změna tuhosti v závislosti na vzdálenosti natočených voštin (mezera), tloušťce okrajů, tloušťce horní a spodní vrstvy a následné posunutí ve směrech x a z pro trysku 0,6 mm a voštiny vzoru grid. Poté vyhodnocení procentuálního snížení tuhosti vůči plnému modelu. ....	61
Tab. 13 Změna tuhosti v závislosti na vzdálenosti voštin trojúhelník (mezera), tloušťce okrajů, tloušťce horní a spodní vrstvy a následné posunutí ve směrech x a z pro trysku 0,6 mm a voštiny vzoru grid. Poté vyhodnocení procentuálního snížení tuhosti vůči plnému .....	62

## 11 Seznam grafů

Graf 1 Lineární aproximace závislosti celkového posunutí na velikosti elementu. Modré kroužky značí posunutí pro konkrétní síť .....	49
Graf 2 Graf aproximace napětí v místě přechodu pro funkci $x^{-1}$ . Modré kroužky značí hodnotu napětí pro konkrétní síť .....	50
Graf 3 Lineární aproximace napětí v místě předeptatého šroubu. Modré kroužky značí hodnotu napětí pro konkrétní síť .....	51
Graf 4 Aproximace napětí v místě dotyku ramene s pouzdem pro pouzdro. Modrá křivka značí aproximaci pomocí funkce $x^{-1}$ a červená čára značí lineární aproximaci. Modré kroužky značí hodnotu napětí pro konkrétní síť. ....	53
Graf 5 Aproximace napětí v místě dotyku ramene s pouzdem pro rameno. Modrá křivka značí aproximaci pomocí funkce $x^{-1}$ a červená čára značí lineární aproximaci. Modré kroužky značí hodnotu napětí pro konkrétní síť. ....	54

## 12 Seznam použité literatury

- [1] VOLLMER, Michael a Klaus-Peter MÖLLMANN. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Druhé. Weinheim: WILEY-VCH VerlagGmbH&Co.KGaA, 2018, 787 s. ISBN 978-3-527-41351-5.
- [2] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 3., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2002. ISBN 80-7196-237-6.
- [3] LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ. *Fyzika pro gymnázia*. 6. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-385-1.
- [4] PICKOVER, Clifford A. *Kniha o fyzice: od velkého třesku ke kvantovému znovuzrození: 250 milníků v dějinách fyziky*. Přeložil Ivan ŠTOLL. Praha: Argo, 2015. Zip (Argo: Dokořán). ISBN 978-80-7363-609-8.
- [5] BYRNES, J. S. *Unexploded ordnance detection and mitigation*. London: Springer in cooperation with NATO Public Diplomacy Division, c2009. ISBN 978-1-4020-9252-7.
- [6] Infračervené záření. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Infra%C4%8Derven%C3%A9\\_z%C3%A1r%C5%99n%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Infra%C4%8Derven%C3%A9_z%C3%A1r%C5%99n%C3%AD)
- [7] ISO 20473:2007. *Optics and photonics — Spectral bands*. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
- [8] CHU, Jennifer. MIT engineers develop “blackest black” material to date: Made from carbon nanotubes, the new coating is 10 times darker than other very black materials. *MIT News* [online]. Cambridge: MIT News Office, 2019 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <http://news.mit.edu/2019/blackest-black-material-cnt-0913>
- [9] BUDZIER, Helmut a Gerald GERLACH. *Thermal infrared sensors: theory, optimization, and practice*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2010. ISBN 9780470871928.
- [10] HADERKA Ondřej a Antonín ČERNOCH. *Detekce světla* [online]. Olomouc: Společná Laboratoř Optiky UP a FZÚ AV ČR, 2009 [cit. 20-03-08]. 168 s. Dostupné z: [http://jointlab.upol.cz/haderka/ds/pr\\_detsvet.pdf](http://jointlab.upol.cz/haderka/ds/pr_detsvet.pdf)
- [11] GOLDSMID, H. J. *The physics of thermoelectric energy conversion*. San Rafael [California] (40 Oak Drive, San Rafael, CA, 94903, USA): Morgan & Claypool Publishers, [2017]. IOP concise physics. ISBN 978-1-6817-4641-8.
- [12] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů – teorie + projekty*. Ostrava, 2015

- [13] PETEROZNEWMAN. Re: Nonlinear Mechanical Physics Preference [příspěvek  
[14]v diskuzním fóru]. In: *Ansys Student Community*[online]. 20.11.2018 [vid.  
2020-05-03]. Dostupné z: <https://studentcommunity.ansys.com/thread/nonlinear-mechanical-physics-preference/>
- [14] ŠTOLL, Ivan. Fyzika pro gymnázia. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-386-8.
- [15] ZUZA, Mikolas. Vše o tryskách s různým průměrem. In: Josef Průša [online]. Praha: Josef Průša, 2018, 29.5.2018 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruzny-m-prumerem/>
- [16] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.